



**Türk Linyitlerinin Çeşitli Biyokütleler ve Atık Manyezit
Tozu ile Pulverize Yanma Özelliklerinin Düşey Borulu
Fırında İncelenmesi**

Program Kodu: 3501

Proje No: 214M332

Proje Yürütücüsü:
Dr. Öğr. Üyesi Feyza Kazanç Özerinç

KASIM 2018
ANKARA



ÖNSÖZ

214M332 kodlu Tübitak kariyer projesinde Türk linyitlerinin çeşitli biyokütleler ve atık manyezit tozu ile birlikte pulverize yanma özellikleri incelenmiştir. Bu projede deney düzeneği olarak ısıtma hızı gerçek yakma sistemlere yakın olan düşey borulu fırın kullanılmıştır. Bahsi geçen fırın proje çerçevesinde öncelikle tasarlanmış ve imalatı tamamlanmış olup daha sonra içerisinde bahsi geçen yakıtların yanması gerçekleşmiştir. Farklı deneysel yöntemler kullanılarak yanan yakıtların yanma kinetikleri, yandıktan sonra oluşturdukları külün fiziksel ve kimyasal özellikleri incelenmiştir. Bu sayede proje çerçevesinde incelenen Soma ve Tunçbilek Türk linyitlerinin, çeşitli biyokütleler (zeytin atığı, badem kabuğu), ve bir endüstri atığı olan manyezit tozu ile beraber yanması derinlemesine incelenmiştir.

Proje ekibi, bu çalışmaya verdiği destekten ötürü Tübitak'a teşekkür etmektedir.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
ÖZET.....	vii
ABSTRACT.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	2
2.1 Düşey borulu fırında kömür ve/veya biyokütlenin yanma çalışmaları.....	2
2.2 Kömür/ biyokütle yanması esnasında oluşan partikül maddeler.....	2
3. MALZEMELER VE DENEYSEL YÖNTEM.....	4
3.1 Yakıt hazırlığı ve karakterizasyonu.....	4
3.2 Deney Düzeneği.....	7
3.2.1 Düşey borulu fırın.....	9
3.2.2 Besleme ünitesi.....	10
3.2.3 Partikül toplama ünitesi.....	12
3.3 Deney koşulları.....	13
3.4 Nümerik yöntem.....	14
3.4.1 Boyutsuz sayılar.....	14
3.4.2 Geometri ve çözüm ağı.....	15
3.4.3 Sınır Koşulları.....	16
3.4.4 Hesaplama da kullanılan modeller.....	17
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	18
4.1 Yanma verimi.....	18
4.1.1 Yakıt etkisi.....	19
4.2 Partikül madde emisyonu.....	19
4.2.1 Yakıt etkisi.....	20
4.2.2 Partikül boyutu etkisi.....	26
4.2.3 Kömür ve biyokütlenin birlikte yanma etkisi.....	27
4.3 Düşey borulu fırın kullanılarak elde edilen kömürün yanma kinetiği.....	30
4.3.1 Kalma süresinin çarın yanma verimine etkisi.....	30
4.3.2 Birinci derece kinetik analizi.....	31
4.4 Deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması.....	32
5. SONUÇ.....	35



6.	GELECEKTEKİ ÇALIŞMALAR VE ÖNERİLER.....	37
7.	REFERANSLAR.....	39

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. Kullanılan katı yakıtların görüntüleri: temin edildiği gibi, öğütülmüş & elenmiş, ve SEM resimleri.....	5
Şekil 2. Bu çalışmada kullanılmış olan yakıtların parçacık boyut dağılımı.....	8
Şekil 3. Düşey borulu fırın, besleme sistemi ve toplama ünitesinin şematik çizimi.....	9
Şekil 4. Besleme sisteminin ve fırına bağlandığı yerin genel görünümü.....	11
Şekil 5. Besleme sisteminin ve fırına bağlandığı yerin genel görünümü.....	11
Şekil 6. Düşey borulu fırın bileşenleri, a)toplama ünitesiyle birlikte gösterilmiş olan fırının fotoğrafı, b) Tecora MSSİ impaktörün detaylı gösterimi, c) Isıtma kablosu ile sarılmış 3 kademeli Tecora MSSİ impaktör.....	12
Şekil 7. Düşey borulu fırın ile su soğutmalı toplama probu.....	13
Şekil 8. İki farklı çözüm ağından alınan analiz sonuçları: düşey borulu fırının merkez çizgisi boyunca a) sıcaklık dağılımı b) hız dağılımı.....	15
Şekil 9. Kullanılan geometrinin enine kesiti ve sınır koşulları.....	16
Şekil 10. Kömür hesaplayıcısı (Coal Calculator): Kömürün endüstriyel ve elemental analizlerini kullanarak kömürün yanma reaksiyonunun stokiyometrik sabitlerini belirler.....	17
Şekil 11. Yakıtların (Tunçbilek linyiti (TL), Soma linyiti (SL) ve zeytin atığının (OR)) düşey borulu fırındaki yanma verimi değerleri. Dikey çubuklar %98 güven aralığındadırlar.....	18
Şekil 12. Yakıtların (Tunçbilek linyiti (TL), badem kabuğu (AS) ve zeytin atığının (OR)) yanmaları sonrasında elde edilen partikül maddelerin farklı boyut aralıklarındaki konsantrasyonu. Dikey çubuklar %98 güven aralığındadırlar.....	20
Şekil 13. Her impaktör kademesi için Tunçbilek linyitinin yanması sonucunda oluşan PM _{2.5} , PM _{2.5-10} , PM _{>10} Optik mikroskop görüntüleri.....	22
Şekil 14. Tunçbilek linyitinin yanması sonucunda elde edilen PM _{2.5} , PM _{2.5-10} ve PM _{>10} parçacıklarının SEM mikroskopik resimleri (Sol taraftaki sütun), ve EDX kimyasal bileşim (Sağ taraftaki sütun).....	24
Şekil 15. Farklı boyutlardaki zeytin atığının (OR) yanması sonucunda oluşan farklı boyutlardaki PM konsantrasyonu (PM (mg)/ beslenen yakıt içerisindeki kül miktarı (g)). Dikey çubuklar %98 güven aralığındadırlar.....	25
Şekil 16. Farklı boyutlardaki badem kabuğunun (AS) yanması sonucunda oluşan farklı boyutlardaki PM konsantrasyonu (PM (mg)/ beslenen yakıt içerisindeki kül miktarı (g)). Dikey çubuklar %98 güven aralığındadırlar.....	26
Şekil 17. Tunçbilek linyiti (TL) ve zeytin atığı (OR) karışımlarının yanması sonucunda oluşan farklı boyutlardaki PM konsantrasyonu (PM (mg)/ beslenen yakıt içerisindeki kül miktarı (g)). Bütün yakıtlar < 125 µm. Dikey çubuklar %98 güven aralığındadırlar.....	27

Şekil 18. Tunçbilek linyiti (TL) ve badem kabuğu (AS) karışımlarının yanması sonucunda oluşan farklı boyutlardaki PM konsantrasyonu (PM (mg)/ beslenen yakıt içerisindeki kül miktarı (g)). Bütün yakıtlar < 125 µm. Dikey çubuklar %98 güven aralığındadırlar.....	27
Şekil 19. TL, OR, ve bu yakıtların karışımlarının PM emisyon dağılımları.....	28
Şekil 20. TL, AS, ve bu yakıtların karışımlarının PM emisyon dağılımları.....	28
Şekil 21. Farklı boyut aralıklarındaki Tunçbilet linyitinin (TL), düşey borulu fırının (DBF) reaksiyon bölgesinin farklı eksenel konumlarından elde edilen yanma verimi.....	30
Şekil 22. Farklı boyut aralığındaki Tunçbilek linyitlerinin (TL), $-\ln(1-\alpha)$ karşı kalma süresi (t) grafiği.....	31
Şekil 23. Enjektörün girişinden beslenen yakıtın sıcaklık profile (sol) ve Düşey borulu fırının sıcaklık kontur görüntüsü (sağ).....	32
Şekil 24. Beslenen yakıtın düşey borulu fırın boyunca kalış süresi (Tire çizgiler düz çizgilerin fit edilmiş halleridir).....	32
Şekil 25. Deneysel ve HAD analizlerinden elde edilen yanma verimi dağılımı.....	33

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. Yakıtların elementel analizleri ve enerji içerikleri.....	6
Tablo 2. Düşey borulu fırın (DBF) deneylerinde kullanılan yakıt ve karışımlar.....	7
Tablo 3. Ortalama yakıt besleme hızları.....	10
Tablo 4. Düşey borulu fırın deney koşulları.....	14
Tablo 5. Sıcaklık bölgesindeki boyutsuz sayılar.....	14
Tablo 6. Kullanılan çözüm ağlarının karakteristik özellikleri.....	15
Tablo 7. Farklı birimlerde Tunçbilek linyitinin (<125 µm) yanması sonucu elde edilen parçacık madde konsantrasyonu.....	20
Tablo. 8. Farklı birimlerde zeytin atığının (<125 µm) yanması sonucu elde edilen parçacık madde konsantrasyonu.....	21
Tablo. 9. Farklı birimlerde badem kabuğunun (<125 µm) yanması sonucu elde edilen parçacık madde konsantrasyonu.....	21
Tablo 10. Farklı birimlerde zeytin atığının (212-300 µm) yanması sonucu elde edilen parçacık madde konsantrasyonu.....	27
Tablo 11. Farklı birimlerde badem kabuğunun (212-300 µm) yanması sonucu elde edilen parçacık madde konsantrasyonu.....	27

ÖZET

Bu projede, düşey borulu fırın kullanılarak iki adet biyokütle (zeytin kalıntısı ve badem kabuğu) ile Türk linyitinin birlikte yakılmasının yanma verimliliğinin artırılması ve gerekli verilerin endüstriye sağlanması amaçlanmıştır. Partikül büyüklüğünün etkisini araştırmak için yakıtlar farklı boyut aralıklarına öğütülmüştür ve yakıtlar arasındaki etkileşimleri analiz etmek için farklı biyokütle / kömür oranlarında mekanik olarak karıştırılmışlardır. Düşey borulu fırın deneyleri yüksek sıcaklık (1000 °C), yüksek ısıtma hızı ($\sim 10^4$ °C s⁻¹) ve kısa kalma sürelerinde (~ 3 s) gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği düşey borulu fırın, besleme ünitesi ve partikül toplama ünitesinden oluşturulmuştur. Yakıt, şırınga pompası kullanılarak düşük kütle besleme hızında (10 g/saat) fırına püskürtülmüştür. Kül parçacıkları reaksiyon alanının sonundan kademeli impaktör ve vakum pompası kullanılarak toplanmıştır. Toplanan partiküller impaktörün farklı kademelerinde partikül madde (PM) çaplarına göre (PM_{2.5}, PM_{2.5-10} ve PM₁₀ (PM > 10)) kategorize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar yakıtların ve yakıt karışımlarının, yanma verimini, yanma kinetiklerini, ve partikül madde konsantrasyon ve karakterizasyonu içermektedir. Büyük parçacıkların yanma verimi aynı kalma sürelerinde küçük parçacıklara kıyasla daha düşük bulunmuştur. Küçük parçacıkların yanma verimi ise ~ 2 s' den daha uzun kalma sürelerinde değişiklik göstermemiştir. PM emisyonu büyük ölçüde yakıtın cinsine ve yakıt karışım oranına bağlı olmuştur. Kullanılan biyokütleler, linyit ile karşılaştırıldığında daha düşük PM_{2.5} oluşumuna neden olmuştur. Yakılan biyokütlenin boyutundaki artış PM>10 emisyonunda artışa neden olurken PM_{2.5} emisyonunda benzer sonuçlar vermiştir. Linyitin tek başına yakılması, biyokütle ile birlikte yakılmasına kıyasla daha düşük PM_{2.5} emisyonuna neden olmuştur. PM_{2.5} emisyonunda görülen bu düşüş her iki biyokütle- kömür karışımında da gözlenmiştir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kullanılarak yapılan analizler, katı yakıt yanmasını etkileyen her bir termo- fiziksel işlemin karakterizasyonu ve deneysel çalışma için tamamlayıcı veriler sağlamıştır. Deney sonuçları HAD analizleri ile karşılaştırılmıştır ve veriler arasında uyum bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: düşey borulu fırın; yanma; Türk linyiti; Türk biyokütlesi; birlikte yanma; PM emisyonları

ABSTRACT

In this project, it is aimed to provide the necessary data for the industry to increase the combustion efficiency through co-firing of Turkish lignite with two biomasses (olive residue and almond shell), in a drop tube furnace experimental system. Fuels pre-processed to different size ranges to investigate the influence of the particle size, and blended in different ratios of biomass / coal to analyze the interactions between fuels. Tests were performed in a drop tube furnace (DTF) at high temperature (1000 °C), high heating rate ($\sim 10^4$ °C s⁻¹), and short residence time (~ 3 s). The experimental setup consisted of a drop tube furnace, a feeding system, and a collection unit. Fuel was fed into the furnace at a low mass rate of 10 g.saat⁻¹ using the syringe pump. Ash particles were collected using a stack impactor and a vacuum pump. Particle collection was either total or categorized according to different particulate matter (PM) diameters, namely, PM_{2.5}, PM_{2.5-10}, and above PM₁₀ (PM_{>10}). The results obtained included particle burnout, particulate matter concentration and characterization, and combustion kinetics. Particle burnout was lower for larger particles (same residence time), and constant for the smallest particles for residence times longer than ~ 2 s. PM emission greatly depended on the fuel and blend. Biomass fuels presented lower values of PM_{2.5} compared to lignite. Larger biomass particles resulted in similar PM_{2.5} emissions, and in an increase of PM_{>10}. Co-firing of biomass with lignite resulted in lower PM_{2.5} emission for either olive residue – lignite or almond shell – lignite blends, as compared to coal firing. Numerical methods provided an additional characterization of each thermo-physical process that affects solid fuel combustion, and supplemental data for the experimental trials. The experimental results were used to validate the numerical models, and a good agreement between the data was found.

Keywords: drop tube furnace; combustion; Turkish lignite; Turkish biomass; co-firing; PM emission

1. GİRİŞ

Türkiye'deki enerji üretimi hala yüksek ölçüde kömüre dayalıdır (2015'teki elektrik üretiminin %28'i). Kömürle elektrik üretimi ele alındığında, ithal edilen bitümlü kömüre kıyasla (%18.7) yerli linyit en yüksek payı almaktadır (%80) (International Energy Agency (IEA) 2016). Türkiye'nin geniş yerli linyit rezervlerine (15.6 milyar ton) sahip olması, ithal fosil yakıtlara olan enerji bağımlılığını azaltma düşüncesini desteklemektedir, bu amaçla da, 2023 yılına kadar linyit enerji santrallerinin kapasitesini 3 katına kadar arttırmak için (International Energy Agency (IEA) 2016) yaygın teşvikler üretilmiştir. Bunun yanı sıra, yerli biyokütlenin Türkiye'de yıllık 32.6 ton eşdeğer petrolük yüksek bir ekonomik potansiyeli olmasına rağmen, 2012 yılında elektrik üretiminin sadece yaklaşık %0.1'i biyokütleden karşılanmıştır (Mills 2014)(Mills, 2014). Ancak linyit kömürlerinin yakılması ile kirletici maddelerin (CO_2 , NO_x , SO_x ve partikül madde) emisyonlarının sorgulanması ve planlanması büyük önem kazanmaktadır. CO_2 , NO_x , SO_x emisyonlarının sera gazı etkisine sahip olmasının yanı sıra, partikül madde (PM) emisyonları, kardiyovasküler hastalıklar ve akciğer kanseri nedeniyle tahmini 3.2 milyon bebeğin prematüre ölümüne sebep olmuştur (IARC, 2018).

Kömür ve biyokütleyi beraber yakmak, mevcut santrallere yapılan küçük değişiklikler ile daha temiz ve sürdürülebilir enerjiye geçiş için bir yol sağlayacaktır. Gelecekte ülkelerin kendilerine ayrılan emisyon hakkını aşmaması ve yenilenebilir enerji yükümlülüklerini yerine getirmeleri için günümüzde işlevini sürdürmekte olan konvansiyonel termik santrallerin çalışmasında değişikliklere gidilmesi gerekecektir. Konvansiyonel termik santraller, fosil yakıtlarla yakılan biyokütle kullanımının artması ile karşı karşıya kalacaktır.

Bu kapsamda, geleneksel yollarla çalışan enerji endüstrisinin temiz enerji üretebilmesi için araştırmalara ihtiyacı olacaktır. Çalışmakta olan konvansiyonel termik santrallerin operatörleri, sadece CO_2 emisyonlarını değil, aynı zamanda NO_x ve SO_x emisyonlarını da azaltmaya yardımcı olmak için biyokütleyi kömürle birlikte (veya sadece biyokütleyi) yakmayı tercih etmektedirler.

Bu anlamda biyokütle ve kömür karışımının birlikte yanmasının verimi ve PM emisyonları araştırılması gereken iki önemli konudur ve bu projenin de temel amaçlarındanıdır. Bu projede birlikte yakmanın yanma davranışı ve PM oluşumu üzerine etkilerini analiz etmek için farklı biyokütle ve kömür yakıtları karıştırılarak laboratuvar ölçekli düşey borulu fırında

yakılacaktır. Düşey borulu fırındaki yanma koşulları, büyük ölçekli kazanlarda bulunan koşullara (kısmen) benzetilerek daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesi hedeflenmektedir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Düşey borulu fırında kömür ve/veya biyokütlenin yanma çalışmaları

Laboratuvar ölçekli düşey boru fırınlar, kömür ve biyokütle gibi toz haline getirilmiş yakıtların yanmasını incelemek için literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır (Costa vd., 2015; Ndibe vd., 2015; Rabaçal vd., 2017; Wang vd., 2014a). Düşey boru fırınlarındaki yanma parametreleri (örn. yüksek sıcaklık, yüksek ısıtma oranları, kısa kalma süreleri), büyük ölçekli yanma kazanlarındaki yanma parametrelerine benzerlik gösterdiği için ve bu deney düzeneklerinde tekrarlanabilirliğin yüksek olmasından dolayı pulverize yanma çalışmalarının araştırılmasında son yıllarda popülerlik kazanmıştır. Düşey boru fırını kullanılarak gerçekleştirilen kömür yakma çalışmaları genellikle yanma davranışı (Costa vd., 2015; Khatami ve Levendis, 2016; Wang vd., 2014a); partikül madde oluşumu (Branco ve Costa, 2017; Costa vd., 2015; Kazanc vd., 2013; Kazanc ve Levendis, 2012; Wen vd., 2015; Zellagui vd., 2017); ve / veya kül biriktirmeye (Ruscio vd., 2016; De Fusco vd., 2016; Jurado vd., 2017; Li vd., 2016; Luan vd., 2014; Wang vd., 2014a) odaklanır.

Düşey boru fırın kullanıldığında yanma verimi verileri, partikül yanma yüzdesi veya anlık karbon monoksit (CO) ölçümünden elde edilebilir. Biyokütle oranının artırılmasının, yüksek uçucu içeriğine sahip biyokütle nedeniyle yanma verimini artırdığı genel olarak literatürde kabul edilmektedir (Arias vd., 2008; Ndibe vd., 2015; Steer vd., 2013; Sung vd., 2016; Wang vd., 2014b). Ancak, ısı değere göre biyokütle / kömür oranlarının % 50'nin üzerinde olması yakıt besleme dengesizliği, alev şekli ve ısı transferinden kaynaklanan sorunlardan dolayı, kömür yakıcılarında uygun olmayabilir (Livingston vd., 2016)(Livingston et al. 2016), Bu nedenle, kömür biyokütle oranlarının yanmayı olumsuz etkilemeyecek alt ve üst değerlerinin belirlenmesi araştırılması gereken konulardan bir tanesidir.

2.2 Kömür/ biyokütle yanması esnasında oluşan partikül maddeler

Kömür yakıtlı enerji üretimi, en çok partikül madde (PM) oluşturan enerji sektörleri arasındadır. Kömür-biyokütle birlikte çalışan enerji santrallerinin artan sayısı ile (Al-Mansour ve Zuwala, 2010), bu santrallerden oluşabilecek partikül madde ile ilgili çalışmaların az oluşu gündeme gelmektedir. Bazı başlangıç çalışmaları, biyokütlenin yanması sonucu

ortaya çıkan 1 mikrondan küçük partikül madde emisyonunun kömürün yanmasından ortaya çıkanlar ile karşılaştırıldığında daha yüksek oranda olduğunu ortaya koymaktadır (Zellagui vd., 2017), ancak, biyokütle ve kömür beraber yakıldığında her ikisinin de içeriğindeki inorganiklerin birbiri ile etkileşiminden oluşacak partikül madde emisyonu tam olarak tahmin edilememektedir. Kömür (Seames, 2003; Wolski vd., 2004; Xu vd., 2011) ve biyokütle (Sippula vd., 2009), için, partikül madde oluşumu sırasındaki iki ana mekanizma şunlardır: (i) çar yapısının dışında olan mineral maddenin parçalanarak doğrudan büyük boyutlu partikül maddeye dönüşmesi (ii) mineral maddenin buharlaşması ve ardından yoğunlaşma sırasında ince partikül haline dönüşmesi.

Bu nedenle, partikül madde oluşumu büyük ölçüde, yakıtın mineral içeriğine (çar yapısının içinde ya da değil) (Wen vd., 2015; Xu vd., 2011) ve yüksek sıcaklıklarda çar/kül partiküllerinin parçalanmasına bağlıdır (Fix vd., 2013; Linak vd., 2002). Dahası, tipik olarak kömür ve biyokütle mineral içeriği farklılık gösterdiği için, partikül madde oluşumu ve oluşan partikül maddelerin karakteristikleri yakıt ile yakından ilgilidir (Feng vd., 2017; Kazanc vd., 2013; Wen vd., 2015; Zhang ve Ninomiya, 2006). Örneğin, biyokütle tipik olarak, düşük buharlaşma noktasına sahip, konvektif ısı değiştiriciler üzerinde yoğunlaşan ve mikron altı partikül madde oluşturan alkali ve alkali toprak metalleri açısından zengindir. Küldeki bu özellik farklı inorganik bileşikler içeren farklı kömür tipleri için de gözlenmiştir. Wen vd. (2015) kömür tipinin yanma sonucunda oluşan partikül madde (PM) üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmalarında, kömür kalitesinin linyitten antrasite artması ile hem mikron altı hem de mikron üstü partikül maddesinin oluşumunu artırdığını gözlemlemişlerdir. Bunun yanı sıra Feng vd. (2017), biyokütle olarak mallee ahşabı, kabuğu ve yaprağını araştırmış ve hem kabuk hem de yapraktan gelen partikül madde emisyonunun oduna göre daha yüksek olduğunu gözlemlemiştir. Zellagui vd. (2017), odunsu biyokütlenin farklı kömürlerle birlikte yanması sırasında açığa çıkan partikül madde emisyonunu incelemiş ve kömüre %25'lik oranda eklenen biyokütlenin, ultra ince PM_{0.1} ve PM_{2.5} oluşumunu en aza indirdiği sonucuna varmıştır.

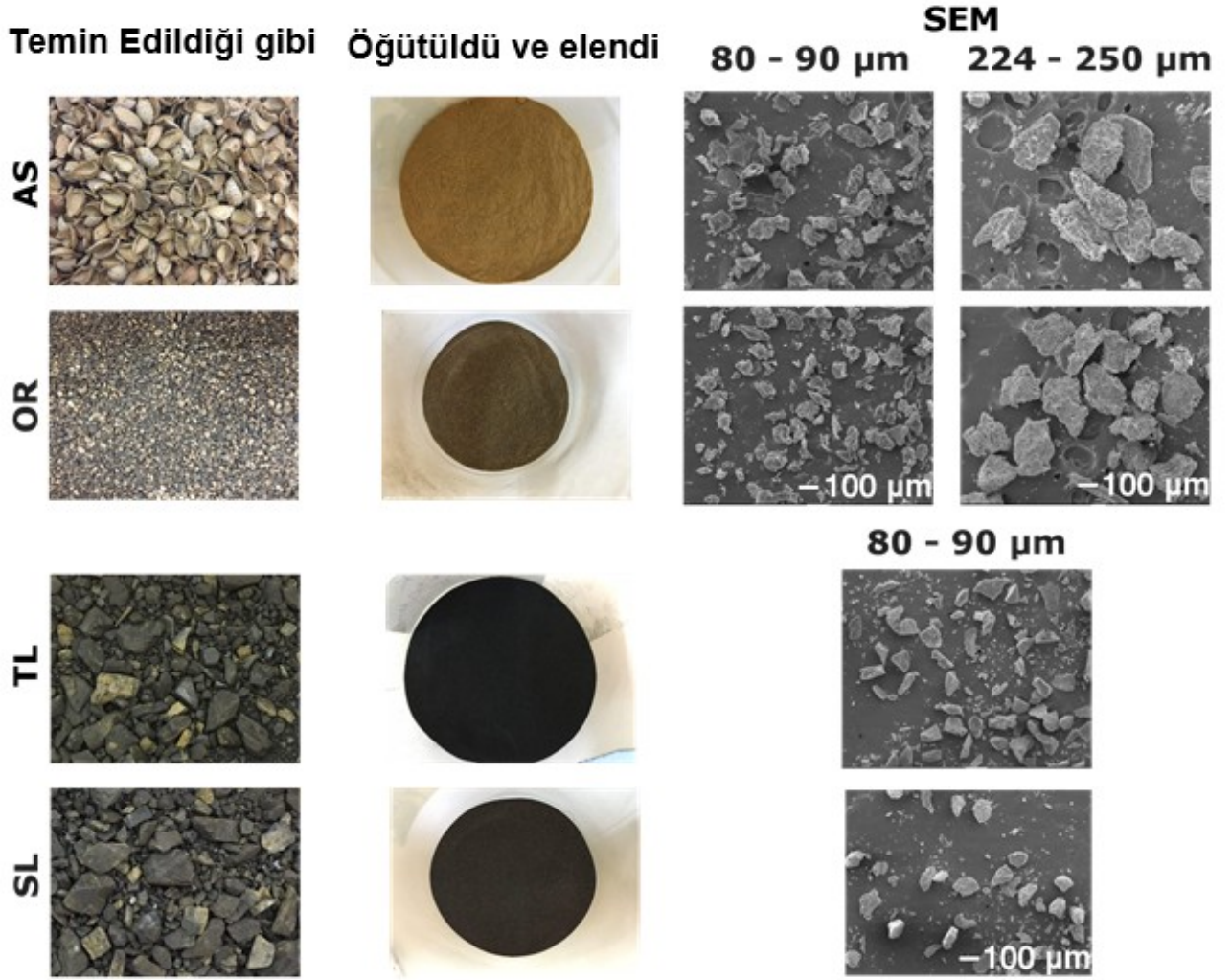
Partikül madde oluşumunu etkileyen diğer faktörler ise yanma sıcaklığı (Costa vd., 2015; Fix vd., 2013; Zhang vd., 2006), kalma süresi (Wang vd., 2014a; Zhuo vd. 2009) ve atmosfer bileşimidir (Ruscio vd., 2014; Kazanc vd., 2013; Li vd., 2013; Suriyawong vd., 2006; Zhan vd., 2015). Zhan vd. (2015), oksî-kömür yanması sırasında partikül madde oluşumunu analiz etmiş ve %50 oksijen içeren yanma atmosferlerinde, 1 mikrondan küçük partikül madde oluşumun atmosferdeki sıcaklık artışıyla arttığını gözlemlemiştir. Benzer oksijen

konsantrasyonlarındaki oksi-kömür koşullarında (dolayısıyla benzer sıcaklıklarda), hem PM10 hem de PM1, konvansiyonel kömür yanmasına kıyasla daha yüksek olduğu tespit edildi (Li vd., 2013). Kazanc ve Levendis (2012) ve Ruscio vd. (2014), farklı kömür ve biyokütlelerin konvansiyonel yanmaya kıyasla, oksi-yakıt yanması sırasında daha düşük mikron üstü ve mikron altı partikül madde oluşturduğunu gözlemlemişlerdir. Fix vd. (2013), sıcaklığın partikül madde modunun oluşumu üzerindeki etkisini incelemiş ve atmosfer sıcaklıklarının 1600 K'den 1500 K'e düştüğünde çoklu-küre, fragmentler, çar ve aglomeraların oluşumunun arttığını gözlemlemiştir.

3. MALZEMELER VE DENEYSEL YÖNTEM

3.1 Yakıt hazırlığı ve karakterizasyonu

Proje süresince biyokütle olarak; badem kabuğu (AS) ve zeytin atığı (OR), linyit olarak; Tunçbilek linyiti (TL) ve Soma linyiti (SL) kullanılmıştır. Kullanılan dört yakıt tipi de Türkiye'nin önemli yerel kaynaklarındandır. Badem kabuğu badem üretiminden elde edilen tarımsal atıktır. Bademder, Mersin'in Gülnar bölgesindeki badem üreticilerini destekleyen bir kooperatiftir. Bu kooperatif sayesinde, Gülnar bölgesinden alınmış badem kabukları, herhangi bir işlemten geçmeden laboratuvara ulaştırılmıştır (bkz. Şek. 1). Zeytin ve zeytin yağı üretiminden elde edilen zeytin atığı ise, Forazeytin adlı şirket tarafından temin edilmiştir. Bu şirket Balıkesir'in Havran bölgesinden zeytinleri işleyerek elde edilen zeytin atığını 5 mm çapına öğütmüş (bkz. Şek. 1) ve %10 nem oranına kadar önceden kurutmuştur. Linyit kömürü Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) tarafından temin edilmiştir. Soma linyiti Manisa bölgesinden elde edilirken Tunçbilek maden bölgesi Kütahya'da bulunmaktadır (bkz. Şek. 1). İki linyit kömürü de tedarikçi olan TKİ tarafından yıkanmıştır. Yıkama işlemi linyitin içinde bulunan ve çar yapısına dahil olmamış (excluded) minerallerin büyük çoğunluğunu linyitten ayırmıştır. Bu işlem türk linyitleri de dahil olmak üzere yüksek miktarda kül içeren kömürler için yaygın olarak kullanılır (International Energy Agency (IEA) 2016).



Şekil 1. Kullanılan katı yakıtların görüntüleri: temin edildiği gibi, öğütülmüş & elenmiş, ve SEM resimleri

Yakıtlara endüstriyel analiz, Perkin Elmer 4000 markalı termo gravimetri cihazı ile Mayoral vd. (Mayoral vd. 2001) çalışmalarında anlatılan yöntem izlenerek yapılmıştır. Bunun yanında elemental analiz D5373-16 standartına göre, kül kompozisyonu ise X-Ray Flörsan analizörü kullanılarak TS EN 15309 standartına göre yapılmıştır. Bu çalışmadaki biyokütle ve kömürlerin alt ısı değerleri sırasıyla Loo ve Koppejan (2008) ve Majumder vd. (2008) çalışmalarındaki bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır. Kullanılan yakıtlara ait endüstriyel analiz, elemental analliz, kül analizi, ve hesaplanmış alt ısı değerler Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Yakıtların elementel analizleri ve enerji içerikleri.

Parametre	Zeytin atığı (OR)	Badem kabuğu (AS)	Tunçbilek linyiti (TL)	Soma linyiti (SL)
Endüstriyel analiz (%kütle, temin edildiği gibi)				
Nem	5.9	8.5	2.81	17.7
Uçucu madde	71.9	73.0	31.1	32.2
Sabit Karbon ^a	17.4	17.6	52.1	37.0
Kül	4.8	0.9	14.0	13.0
Elementel analiz (%kütle, kuru, külsüz)				
C	46.6	45.4	61.8	61.2
H	6.40	6.34	5.60	4.66
N	0.58	0.36	2.65	1.15
S	-	-	1.45	1.30
O ^a	46.4	47.9	28.5	31.7
İnorganik Türler (%kütle, kuru)				
Si	4.60	0.358	33.3	31.6
Al	1.76	0.0933	12.9	17.6
Fe	7.95	1.410	22.3	16.2
Ca	26.4	52.1	1.91	12.7
Mg	1.23	0.130	1.73	0.724
Na	-	-	-	0.462
K	48.6	41.2	3.16	3.83
P	1.98	2.02	0.119	0.254
Ti	-	-	2.87	1.98

S	4.46	0.335	-	0.063
Cl	2.37	0.459	19.1	14.1
Kalorifik değeri ^b (MJ kg ⁻¹)	16.4	15.3	25.7	19.6

^a fark yöntemiyle.

^b değerler Loo ve Koppejan (2008) ve Majumder vd. (2008)'nin çalışmalarında sırasıyla biyokütle ve kömür için bulunmuştur.

Bu çalışmada kullanılan yakıtlar (bkz. Şek. 1) farklı boyut aralıklarına öğütülüp elenmiştir. Bütün yakıtlar için tanecik boyutu 125 µm'den küçük olacak şekilde boyut aralığı seçilmiştir. Bu numunelere ek olarak, tanecik boyutu etkisinin gözlemlenebilmesi için 106-125 µm ve 212-300 µm boyut aralığı tunçbilek linyiti (TL) için; 212-300 µm boyut aralığı da her iki biyokütle (AS ve OR) için kullanılmıştır (bkz. Tablo 2).

Bütün yakıtlar gece boyunca 105 °C'de kurumaya bırakılmıştır. Kurutma işlemi pülverize yakıtın fırının içine beslenmesini kolaylaştırmaktadır. Ayrıca yakıtın içinde bulunan nemi uzaklaştırarak, nemin yanma işlemini etkilemesini önlemiştir. Kömürün biyokütle ile birlikte yanması araştırılırken, çapı 125 µm'den küçük yakıtlar kurutulduktan sonra kütlece %25 biyokütle - %75 kömür ve %50 biyokütle - %50 kömür olacak şekilde mekanik olarak karıştırılmıştır. (bkz. Tablo. 2).

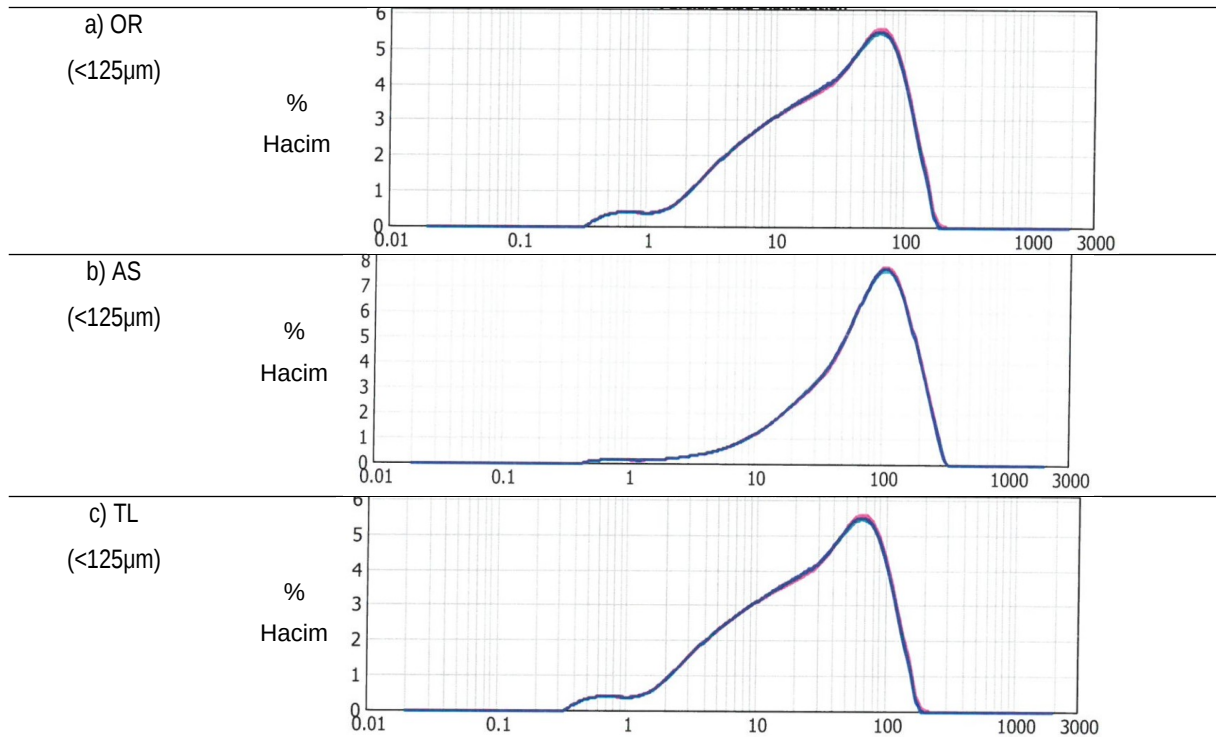
Tablo 2. Düşey borulu fırın (DBF) deneylerinde kullanılan yakıt ve karışımlar

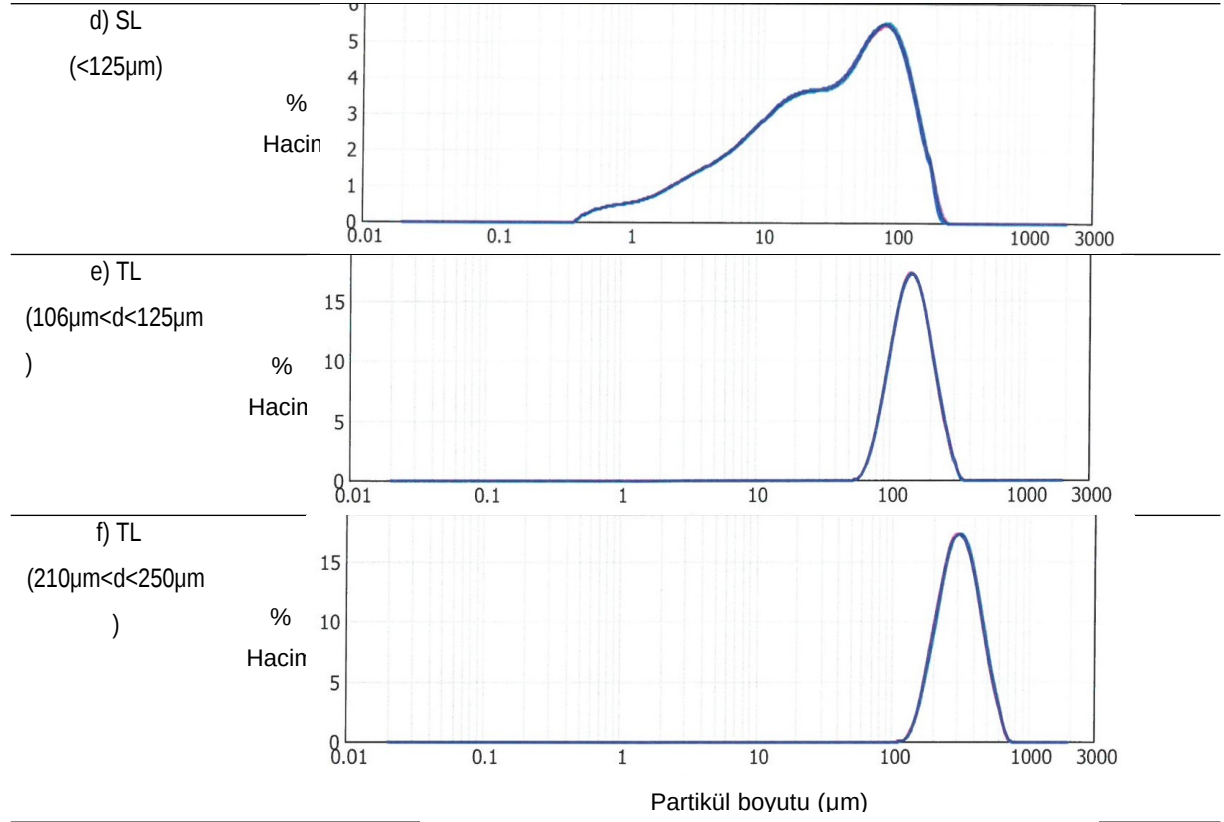
Sadece Yakıt				Ağırlıklar (wt.%)			
Yakıt/ Karışım	OR	AS	TL	50OR- 50TL	25OR- 75TL	50AS- 50TL	25AS- 75TL
Boyut aralığı (µm)	<125 212-300	<125 212-300	<125 106-125 210-250	<125	<125	<125	<125

Tanecik boyutu $125\ \mu\text{m}$ 'den küçük olacak şekilde elenmiş yakıtlar için Malvern Mastersizer 2000 cihazı kullanılarak ıslak parçacık boyut dağılım analizi yapılmıştır. Sonuçlar Şekil 2' te gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, bütün parçacıkların boyutunun $125\ \mu\text{m}$ 'den küçük olduğu doğrulanmıştır. Bunun yanı sıra, OR ve AS yakıtlarının %50'sinin boyutlarının sırasıyla 53, 76 μm 'den küçük olduğu, ancak linyitlerin %50'sinin 30 μm 'den küçük olduğu tespit edilmiştir.

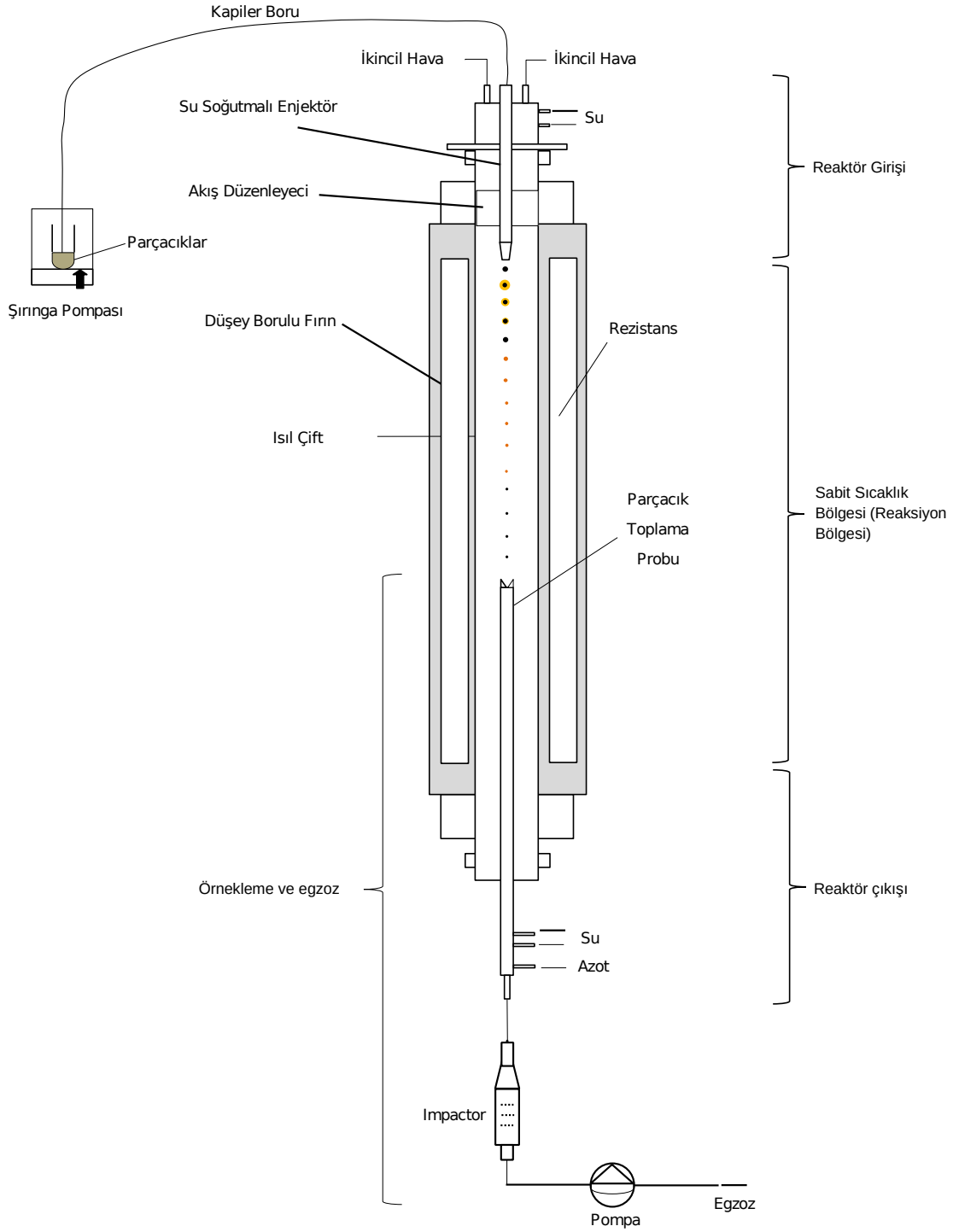
3.2 Deney Düzeneği

Bu çalışmada kullanılmış olan deney düzeneği şematik olarak Şekil 3' de gösterilmiştir. Deney düzeneği düşey borulu fırın, besleme sistemi ve toplama ünitesinden oluşmaktadır.





Şekil 2. Bu çalışmada kullanılmış olan yakıtların parçacık boyut dağılımı



Şekil 3. Düşey borulu fırın, besleme sistemi ve toplama ünitesinin şematik çizimi.

3.2.1 Düşey borulu fırın

Düşey borulu fırın (Protherm PTF 15.75.1000) Si ve MoSis elektrikli ısıtma elemanları ile ısıtılan bir fırındır. Bu elemanlar 7.5 kW ısı verebilir ve fırının duvar sıcaklığını 1500 °C sıcaklığına kadar çıkarabilmektedirler. Sıcaklık ölçümü S-tipi ısıl çift tarafından yapılmıştır.

Ana malzemesi alüminyum oksit olan ve uzunluğu 1500mm, iç çapı ise 75 mm olan tüp reaksiyonun gerçekleştiği alan olarak kullanılmıştır. 1500 mm boyundaki düşey borulu fırın, 1000 mm uzunluğunda reaksiyon bölgesine sahiptir.

3.2.2 Besleme ünitesi

Pülverize yakıtlar, cam deney tüpünden şırınga pompası (Harvard Apparatus 22) yardımıyla taşınarak düşey borulu fırına beslenmiştir. Kullanılan şırınga pompasının görseli Şekil 5' de verilmiştir. Şırınga pompasının doğrusal hareketi yakıt ile şırınga pompasının kılcal tüpü (iç çap: 2mm) arasında ~3 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Kılcal tüpte oluşabilecek tıkanma ve pülverize yakıtın tüp içinde topaklanmasını önlemek için 12 V titreşim motoru kullanılmıştır. Pülverize yakıt cam tüpün içine enjekte edilen hava yardımıyla kılcal tüpe aktarılmıştır. Pülverize yakıt düşey borulu tüpün reaksiyon alanına kılcal tüp ve su soğutmalı enjektör yardımıyla yukardan enjekte edilmiştir. Taşımaya yardım eden hava 4 L min⁻¹ hızla cam tüpe beslenirken, yanmanın tamamlanması için gereken ikincil hava direk olarak reaksiyon bölgesine 16 L min⁻¹ hızında beslenmiştir. Bütün yakıtlar beslemenin daha kolay olabilmesi için bir gece öncesinden kurutulmuştur. Yakıtın besleme hızı deney boyunca sabit tutulmuş ve bütün yakıtlar için ölçülen besleme hızları Tablo 3'de gösterilmiştir.

Tablo 3. Ortalama yakıt besleme hızları

Yakıt	Ortalama besleme hızı (g/saat)	%98 güven aralığı
Tunçbilek linyiti	10.2	1.05
Soma linyiti	10.3	1.04
Badem kabuğu	15.5	0.3
Zeytin atığı	9.8	0.42



Şekil 4. Besleme sisteminin ve fırına bağlandığı yerin genel görünümü

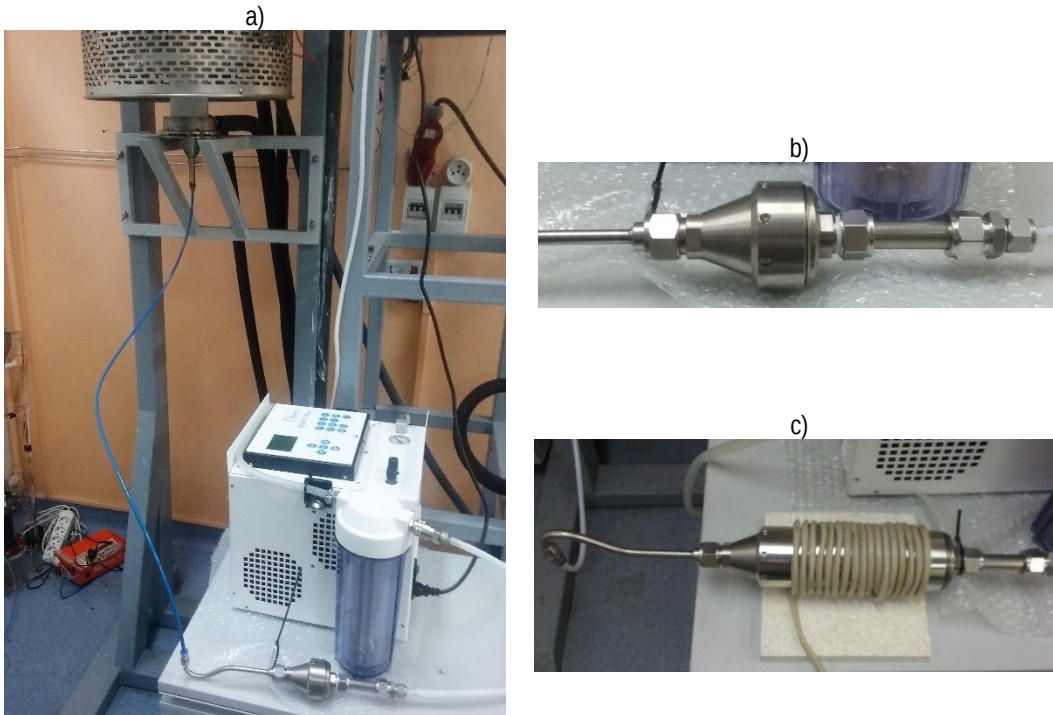


Şekil 5. Besleme sisteminin ve fırına bağlandığı yerin genel görünümü

3.2.3 Partikül toplama ünitesi

Fırından partiküller bir parçacık toplama sistemi ile iki şekilde toplanmıştır 1) parçacıkların fırının sonundan toplanması, 2) fırının düşey eksenini boyunca parçacıkların toplanması. Her iki toplama yönteminde de Şekil 6'da görülen kül impaktörü ve vakum pompası kullanılmıştır. Tecora MSSİ PM10-2.5 Multistage Stack Impactor modele sahip impaktör ise ya bir kademeli ya da 3 kademeli olarak kullanılmıştır. 1 kademeli konfigürasyon, numunenin parçacık boyutuna bağlı olmaksızın hepsinin toplanması için kullanılırken, 3 kademeli impaktör toplanan numuneleri parçacık boyutuna göre üçe ayırmaktadır: $d < 2.5 \mu\text{m}$ (PM_{2.5}); $2.5 < d < 10 \mu\text{m}$ (PM_{2.5-10}); and $d > 10 \mu\text{m}$ (PM_{>10}).

Kül/çar partiküllerinin fırının düşey eksenindeki farklı noktalardan toplanması su soğutmalı prob sayesinde gerçekleştirilmiştir (bkz. Şekil 7). Su soğutmalı toplama probu reaktörün merkezine hizalanmış ve bir mekanizma sayesinde düşey eksende aşağı yukarı hareket edebilmektedir. Toplama probunda parçacıkların her hangi bir reaksiyona devam etmemesi için hem su soğutması hem de probun uç kısmından içeriye doğru nitrojen ilavesi yapılmıştır.



Şekil 6. Düşey borulu fırın bileşenleri, a)toplama ünitesiyle birlikte gösterilmiş olan fırının fotoğrafı, b) Tecora MSSİ impaktörün detaylı gösterimi, c) Isıtma kablosu ile sarılmış 3 kademeli Tecora MSSİ impaktör

Her iki konfigürasyonda da (fırının sonundan ya da düşey eksen boyunca toplanması) impaktör kademelerine 47 mm çapında kuvars mikrofiber filtreler (tip T-293) yerleştirilmiştir. Kuvars filtreler, yapılarında bulunabilecek uçuculardan arındırılmak için deney öncesinde ısıtılma işlemine tabii tutulmuştur. Filtrelerin yerleştirildiği impaktörle partikül toplama yakıtın cinsine göre 5, 10, ya da 15 dakika sürmüştür. Farklı süreler, yakıtların içeriğinde farklı miktarlarda kül barındırması ile ilgilidir, her yakıtın birim zamandaki kül emisyonu farklı olduğu için filtreleri doyuma ulaştırma süreleri de farklıdır. Parçacık toplama deneyleri tekrarlanabilirlik açısından olumlu sonuçlar vermiştir.



Şekil 7. Düşey borulu fırın ile su soğutmalı toplama probu

3.3 Deney koşulları

Düşey borulu fırın 1000 °C sabit sıcaklıkta ve 20 Lpm toplam kuru hava akışıyla çalıştırılmıştır. Su soğutmalı enjektör tarafından enjekte edilen hava birincil (merkez) akış (4 lpm) ve ikincil akış (16 lpm) olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Bu koşullar altında pülverize yakıtın ısınma hızının $10^3 - 10^4$ K s⁻¹ olması beklenmektedir. Yakıtça fakir yanma koşullarını korumak ve yakıt parçacıkları arasındaki etkileşimleri (Örneğin, parçacıkların çevresinde hava-uçucu oranında değişiklikler veya parçacıklar arasında radyasyon ısı değişimi) en aza indirmek için yakıt besleme hızı 10 (+/-1) g/saat aralığında tutulmaya çalışılmıştır.

3.4 Nümerik yöntem

214M332 kodlu Tübitak kariyer projesinin nümerik çalışmasında, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği bölümü Temiz Yanma Teknolojileri Laboratuvarında bulunan düşey borulu fırın ANSYS Fluent yazılımı ile Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Geometri içindeki akışı analiz etmek için düşey borulu fırının tam geometrisi kullanılmıştır.

Nümerik analizlerin amaçları;

- Düşey borulu fırının içindeki sıcaklık ve akış hızı profillerini elde etmek. Beslenen yakıtın maruz kaldığı çevresel faktörleri elde etmek
- DeneySEL olarak elde edilen yanma verimini HAD analizleri ile onaylamak

Analizlere başlanmadan önce gerekli boyutsuz sayıları kullanarak HAD analizlerinde izlenmesi gereken yol bulunmuştur. Daha sonar düşey borulu fırının tam geometrisi çizilmiş ve çözüm ağı oluşturulmuştur. Gerekli çözücü seçenekleri ve sınır koşulları Fluent yazılımında seçilmiş ve analizler yapılmıştır.

3.4.1 Boyutsuz sayılar

Düşey borulu fırında akışkan hareketine yol açan baskın olayları belirlemek için boyutsal sayılar (Reynolds, Prandtl, Grashof ve Rayleigh sayıları) hesaplanmıştır. Düşey borulu fırın deneylerinin koşulları Tablo 4' te verilmiştir. Hesaplanan boyutsuz sayılar Tablo 5' te verilmiştir.

Tablo 4. Düşey borulu fırın deney koşulları

L (Sıcak bölge uzunluğu) = 1 m
G (Yerçekimi ivmesi) = 9.81 m/s ²
D (Düşey borulu fırın iç çapı) = 75 mm
V ₁ (Beslenen hava debisi) = 20 L/dk
T _w (Sıcak bölge duvar sıcaklığı) = 1273 K
T _∞ (Beslenen havanın sıcaklığı) = 293 K

Tablo 5. Sıcaklık bölgesindeki boyutsuz sayılar

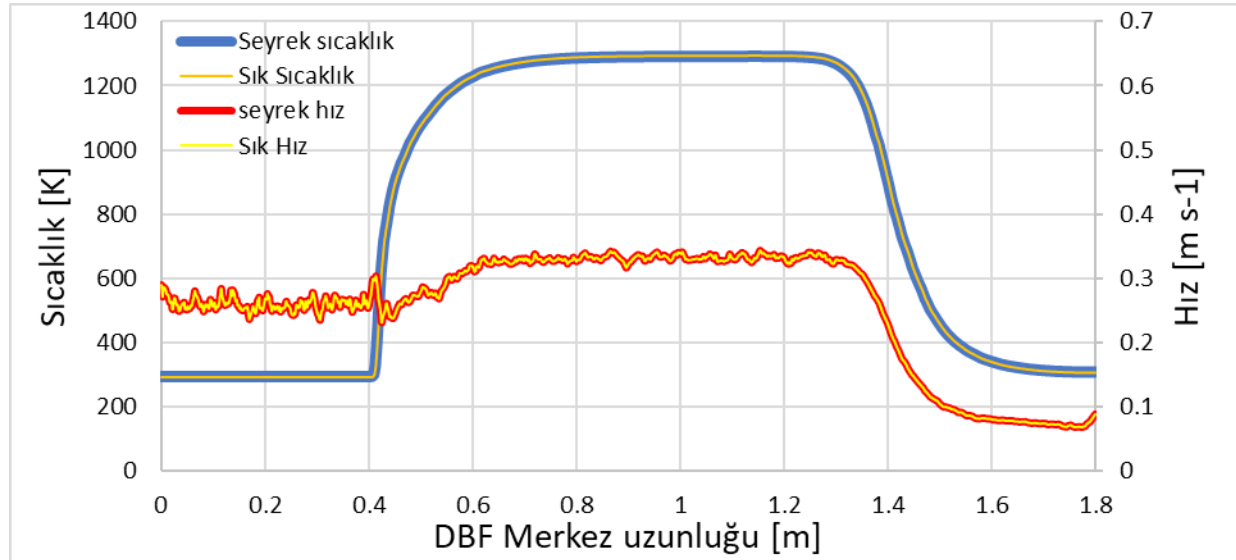
Reynolds sayısı	Grashof sayısı	Rayleigh sayısı
239.4	478806.2	335164.3

Bu çalışmada görüldüğü üzere düşey borulu fırında akışkan hareketine yol açan baskın olay doğal konveksiyondur ($Gr/Re^2 \gg 1$). Ayrıca, ısıtma bölgesi içindeki Grashof numarası

nedeniyle akış türbülanslıdır. Kaldırma kuvvetinin viskoz kuvvetlere göre büyük olmasından dolayı, viskoz kuvvetler akışkan hareketinin hızlı dalgalanmalarının oluşumunu engelleyemez.

3.4.2 Geometri ve çözüm ağı

Bu çalışmada Düşey borulu fırının (DBF) geometrisi ve çözüm ağı ANSYS yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. DBF ve içindeki su soğutmalı enjektörün tam geometrileri kullanılmıştır. ANSYS kullanılarak oluşturulan çözüm ağı dört yüzlü elemanlardan oluşmaktadır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde çözümlemede ağıdan bağımsızlığı göstermek üzere iki farklı çözüm ağında (bkz. Tablo 6) analizler yapılmıştır. Şekil 8’ de görüldüğü üzere seyrek çözüm ağından alınan sonuçlar sık çözüm ağından alınanlara birebir eşleşmektedir.



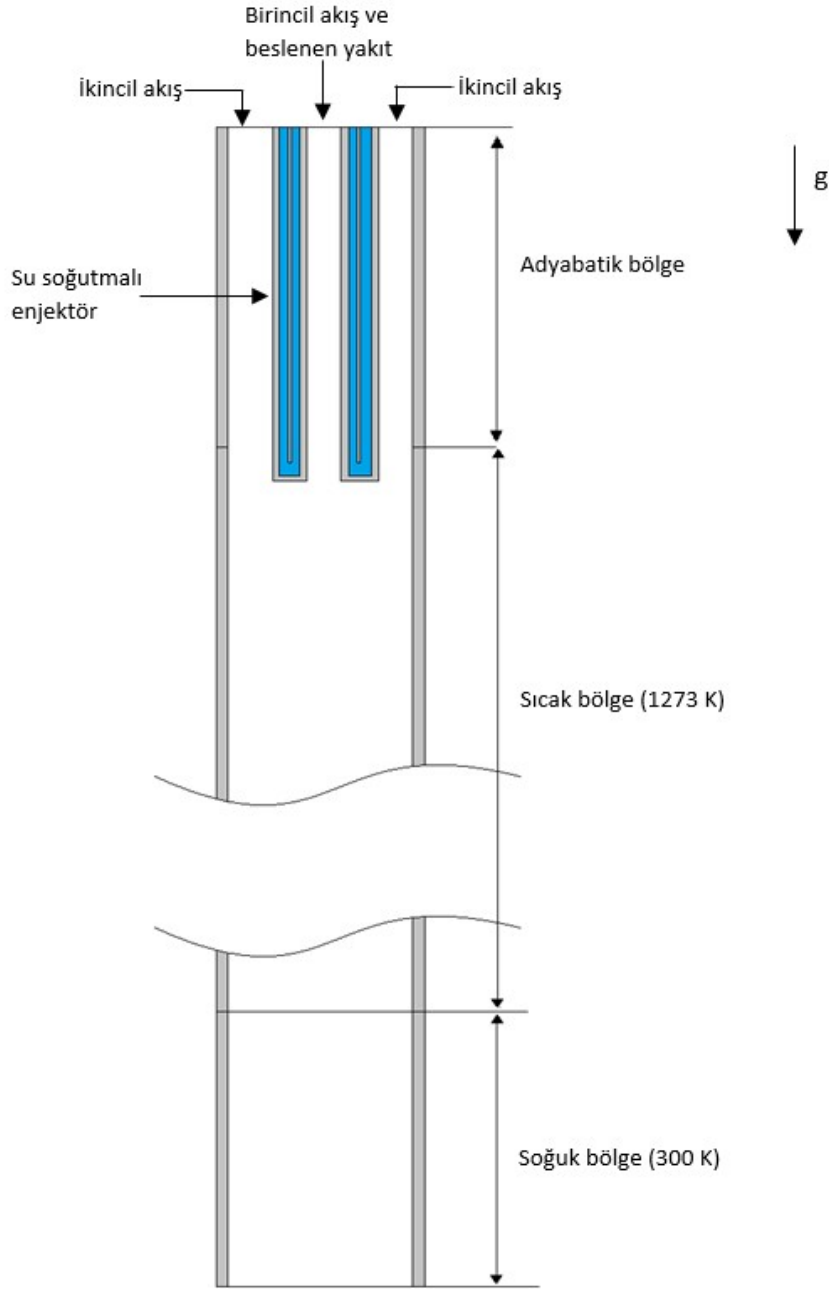
Şekil 8. İki farklı çözüm ağından alınan analiz sonuçları: düşey borulu fırının merkez çizgisi boyunca a) sıcaklık dağılımı b) hız dağılımı

Tablo 6. Kullanılan çözüm ağlarının karakteristik özellikleri

	Seyrek çözüm ağı	Sıkı çözüm ağı
Eleman sayısı	1790511	8622017
Ortalama Çarpıklık	0.18264	0.18495
Ortalama en-boy oranı	3.0388	2.3282

3.4.3 Sınır Koşulları

Analizlerde atanan sınır koşulları kullanılan geometrinin enine kesiti üzerinde verilmiştir. (bkz. Şekil 9).



Şekil 9. Kullanılan geometrinin enine kesiti ve sınır koşulları

Düşey borulu fırın içindeki ortam kütlece %23 O₂ - %77 N₂ olarak tanımlanmıştır. Ortamda bulunan gaz karışımının bütün ısıl ve akışkanlar mekaniği özellikleri (örn. Özkütle, viskozite, termal iletkenlik) sıcaklığa bağlı birer fonksiyon olarak tanımlanmıştır.

3.4.4 Hesaplamada kullanılan modeller

Radyasyon ısı transferinin Düşey borulu fırında kömür yanması üzerinde önemli bir etkiye sahip olması nedeniyle, ayrık ordinat (DO) modeli ile simülasyona radyasyon ısı transferi uygulanmaktadır. Baslenen pulverize kömür parçacıkları Random walk modeli kullanılarak

takip edilmiştir. Duvarın yakınındaki baskın doğal konveksiyon etkileri nedeniyle, düşey borulu fırındaki akış türbülanslı akış olarak modellenmiştir (K-epsilon modeli). Gaz fazdaki reaksiyonlar eddy-dissipation modeli kullanılarak modellenmiştir. Bu model, kömür yanmasını difüzyon sınırlı olarak kabul etmektedir.

Fluent çözücüsünde düşey borulu fırın analizleri için kullanılan denklemler:

- Kütlelerin korunumu denklemi
- X- momentum
- Y- momentum
- Z-momentum
- Türbülans için transport denklemleri
- Enerjinin korunumu denklemi
- İdeal gaz denklemi
- Türlerin korunumu denklemi (Species equations)
- Arrhenius formunda hız yasası: Gerekli stokiyometrik sabitler Fluent'in kömür hesaplayıcısı (coal calculator, bkz. Şekil 10) kullanılarak atanmıştır. Kömür hesaplayıcısı kömürün endüstriyel ve elemental analizlerine ihtiyaç duymaktadır.

Proximate Analysis		Ultimate Analysis (DAF)	
Volatile	0.33	C	0.63
Fixed Carbon	0.52	H	0.06
Ash	0.15	O	0.3
Moisture	0	N	0.01

Mechanism	Options
<input checked="" type="radio"/> One-step Reaction	<input type="checkbox"/> Wet Combustion
<input type="radio"/> Two-Step Reaction	
<input type="checkbox"/> Include SO2	

Settings	
Coal Particle Material Name	coal-particle
Coal As-Received HCV (J/kg)	2.4e+07
Volatile Molecular Weight (kg/kgmol)	30
CO/CO2 Split in Reaction 1 Products	1
High Temperature Volatile Yield	1
Fraction of N in Char (DAF)	0.7

Gas Phase Reaction
$C0.11H4.59O1.44N0.0551 + 0.54O2 \Rightarrow 0.11CO2 + 2.29H2O + 0.0275N2$

Şekil 10. Kömür hesaplayıcısı (Coal Calculator): Kömürün endüstriyel ve elemental analizlerini kullanarak kömürün yanma reaksiyonunun stokiyometrik sabitlerini belirler.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Yanma verimi

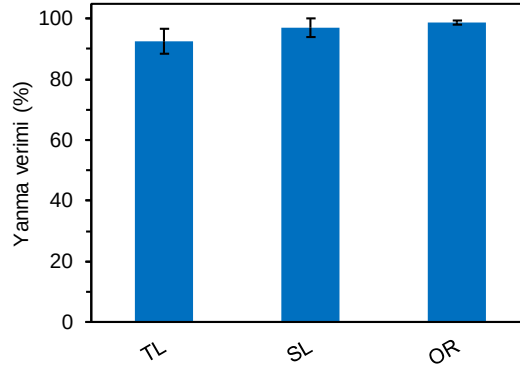
Yanma verimi testleri bir kademeli MSSİ impaktör kullanılarak yapılmıştır. Numuneler düşey borulu fırının çıkışından kuvars mikrofiber filtre kullanılarak toplanmıştır. Kül oranını elde etmek için, toplanan numuneler kömür için ASTM D3174-12 (ASTM 2011) ve biyokütle için ASTM E1755-01 (Undri vd., 2015) standart prosedürlerine uygun olarak kül fırınında yakılmıştır. Daha sonra, parçacık yanma verimi, ψ (Costa vd., 2015), formül (1) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\psi = \frac{1 - \frac{\omega_f}{\omega_x}}{1 - \omega_f} \quad (1)$$

Bu formülde, beslenen yakıtın kül oranı ω_f ve toplanan numunenin kül oranı ω_x ile gösterilmiştir.

4.1.1 Yakıt etkisi

Yanma verimi analizlerinin sonuçları Şekil 11' de gösterilmiştir. Şekilde, fırına beslenen yakıtların hepsinin yanma veriminin yaklaşık %100 olduğu görülmüştür. Dolayısıyla fırının sonundan yanma sonucunda toplanan parçacıkların tamamının inorganik içerikli kül parçacıkları olduğu varsayımı doğrulanmıştır. Bu da ileride yapılacak parçacık boyutuna göre küllerin sınıflandırılması deneylerinde toplanan küllerin tamamının inorganik içerikte olduğu varsayımını güçlendirmiştir. Elde edilen yüksek yanma verimi, tunçbilek linyitine benzer bileşime sahip yüksek uçucu bir bitümlü kömür de dahil olmak üzere çeşitli kömürlerin yanma verimini incelemek için bir düşey borulu fırını kullanmış olan Arias vd. (2008) tarafından da gözlenmiştir.



Şekil 11. Yakıtların (Tunçbilek linyiti (TL), Soma linyiti (SL) ve zeytin atığının (OR)) düşey borulu fırındaki yanma verimi değerleri. Dikey çubuklar %98 güven aralığındadırlar.

4.2 Partikül madde emisyonu

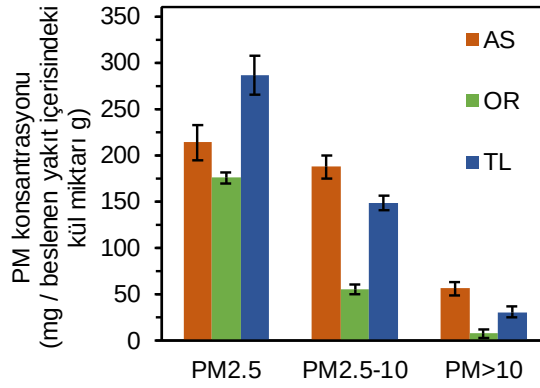
Tunçbilek linyiti (TL), badem kabuğu (AS) ve zeytin atığının (OR) düşey borulu fırında partikül madde oluşumu incelenmiştir. Buna ek olarak, zeytin atığının iki farklı boyuttaki (125 μm 'dan küçük ve 212-300 μm arasında) PM oluşumu kıyaslanarak partikül madde oluşumuna yakıt boyutunun etkisi incelenmiştir. TL linyitinin OR ve AS biyokütleleri arasındaki olası sinerjiyi değerlendirmek için linyit biyokütleler ile ayrı ayrı farklı oranlarda karıştırılarak partikül madde oluşumları incelenmiştir. 3-kademeli impaktör yanma sonucunda oluşan partikülleri 3 farklı boyut aralığında toplamak için kullanılmıştır. İki farklı kül miktarına sahip yakıtın kıyaslanabilmesi için, bütün konsantrasyonlar PM(mg)/beslenen yakıt içerisindeki kül miktarı(g) birimi ile verilmiştir. Üzerine çalışılan bütün yakıtların konsantrasyonları literatürle daha kolay kıyaslanabilmesi için Tablo 7, 8 & 9' da gösterilmiştir.

4.2.1 Yakıt etkisi

Kullanılan yakıt tipinin partikül madde (PM) oluşumunda büyük etki sahibi olduğu bilinmektedir (Feng vd., 2017; Kazanc vd., 2013; Wen vd., 2015; Zhang ve Ninomiya, 2006). Bu kısımda linyit kömürü ve biyokütlelerin yanmaları sonucu oluşturdukları ince küller olan PM_{2.5} ve kaba küller olan PM₁₀ and PM_{>10} kıyaslanmıştır. Bu çalışmanın sonuçları Şekil 12' de gösterilmiştir.

PM_{2.5} konsantrasyonu TL için en yüksek (yakıt beslemede 286 mg / g kül), ardından AS (214) ve OR (176) olarak elde edilmiştir. Tablo 7' de görüldüğü gibi, Tunçbilek linyitinin partikül madde konsantrasyonu literatürde olan değerlerle benzerlik göstermiştir. Kazanc ve Levendis (2012) düşey borulu fırın kullanarak farklı tip kömürlerin PM emisyonunu incelemiş ve aynı çalışmadaki linyit kömürünün PM_{2.5} ve PM₁₀ değerlerini sırasıyla ~8 ve ~15 (mg/g

beslenen yakıt) olarak bulunmuştur. Wen vd. (2015) tarafından yapılmış bir başka çalışmada ise, üç farklı kömür analiz edilmiş ve PM10 konsantrasyonu ortalama ~70 (mg/g beslenen yakıt) olarak raporlanmıştır. Bu çalışmada TL yanmasından elde edilen PM10 konsantrasyonu daha yüksek olarak tespit edilmiştir (435 mg/ beslenen yakıt içerisindeki kül miktarı (g)). PM1-10 oluşumunu belirleyen iki olay vardır (Wen vd. 2015): mineral maddelerin kümelenmesi ve çarın parçalanmasıdır. Tunçbilek linyitinin bir başka çalışmada (Magalhães vd. 2019) benzer koşullar altında hafif parçalanma geçirdiği gözlenmiştir. Ayrıca, aynı çalışmada (Magalhães vd. 2019) ~ 1500 °C' lik kömür yanma sıcaklıkları ölçülmüş ve Fe₂O₃'ün (erime sıcaklığı: 1565 °C) erimesi için yeterli olsa da, SiO₂ (erime sıcaklığı: 1710 °C) için yeterli değildir. Elde edilen sonuçlar TL için PM10 oluşumunun çar parçalanması ile belirlendiğini göstermiştir.



Şekil 12. Yakıtların (Tunçbilek linyiti (TL), badem kabuğu (AS) ve zeytin atığının (OR)) yanmaları sonrasında elde edilen partikül maddelerin farklı boyut aralıklarındaki konsantrasyonu. Dikey çubuklar %98 güven aralığındadırlar.

Tablo 7. Farklı birimlerde Tunçbilek linyitinin (<125 µm) yanması sonucu elde edilen parçacık madde konsantrasyonu

PM konsantrasyon birimi	PM2.5	PM2.5-10	PM1	PM>10
		10	0	
mg/m ³ hava	329.	171	500.2	36
mg/ beslenen yakıt içerisindeki kül miktarı (g)	286.	148.8	435.1	31.2
mg/ beslenen yakıt (g)	40.08	20.83	60.91	4.37

Zeytin atığının (OR) PM2.5 değerleri Tablo 8' de ~ 9 (mg/g beslenen yakıt) olarak belirtilmiştir. Bu değer yapılan çalışmaya paralel olarak, Ruscio vd. (2014) yaptığı çalışmada

zeytin atığı için ~26 (mg/g beslenen yakıt) ve mısır atığı için ~3 (mg/g beslenen yakıt) olarak bulunmuştur. Bu çalışmadaki zeytin atığının uçucu madde, sabit karbon ve kül değerleri Ruscio vd. (2014) üzerine çalıştığı 2 yakıtın değerlerinin arasındadır ve bulunan PM2.5 değerlerini desteklemektedir. Benzer davranışlar PM10 konsantrasyonu için de gözlenmiştir.

Tablo. 8. Farklı birimlerde zeytin atığının (<125 µm) yanması sonucu elde edilen parçacık madde konsantrasyonu

PM konsantrasyon birimi	PM2.5	PM2.5-10	PM1	PM>1
mg/m ³ hava	59.8	20.0	84.6	3.0
mg/ beslenen yakıt içerisindeki kül miktarı (g)	175.	55.5	233.	8.1
	6		0	
mg/ beslenen yakıt (g)	8.96	2.83	11.9	0.4

Tablo. 9. Farklı birimlerde badem kabuğunun (<125 µm) yanması sonucu elde edilen parçacık madde konsantrasyonu

PM konsantrasyon birimi	PM2.5	PM2.5-10	PM1	PM>1
mg/m ³ hava	49.5	43.4	92.9	13.
			0	
mg/ beslenen yakıt içerisindeki kül miktarı (g)	213.	187.4	401.	56.
	7		2	7
mg/ beslenen yakıt (g)	8.3	7.3	15.6	2.2

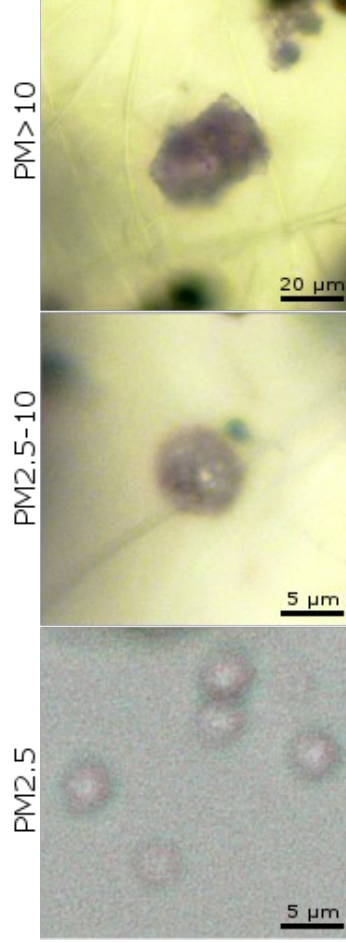
Zeytin atığı (OR) ve badem kabuğunun yanmasında elde edilen PM2.5 emisyonu (sırasıyla 176 ve 213 mg/g beslenen yakıt içerisindeki kül miktarı) Tuçbilek linyitinden (TL) elde edilene (286 mg/g beslenen yakıt içerisindeki kül miktarı) göre daha düşük bulunmuştur, bkz. Şekil 12. Biyokütle küllerinin kömür külüne göre daha yüksek konsantrasyonlarda mikron altı partikül madde oluşurmasının nedeni alkali ve toprak alkali metallerin varlığı olmuştur. Bu maddeler düşük buharlaşma noktasına sahiptirler ve buharlaşma- yoğunlaşma mekanizması ile mikron altı partikül madde oluşturma eğilimindedir.

Linyit ve biyokütlelerin içerdikleri kül miktarının oldukça farklı olmasından dolayı eğer aynı PM2.5 emisyon değeri beslenen yakıt miktarı cinsinden alınırsa, bu eğilimin tersine çevrildiği ve kömür PM2.5 emisyonunun (16 mg/g beslenen yakıt), biyokütleninkilerden (9 mg/g beslenen yakıt) daha yüksek olduğu görülmüştür, bkz. Tablo 7, 8 ve 9. PM2.5 emisyon

konsantrasyonu biyokütle için daha yüksek olmasına rağmen biyokütlenin düşük kül miktarı, kömür ve biyokütlenin birlikte yanması işlemi için önemli rol oynamaktadır ve dikkate alınmalıdır.

Patikül madde emisyonunu daha detaylı incelemek için, Tunçbilek linyitinin farklı boyut aralıklarındaki PM emisyonlarının (PM_{2.5}, PM_{2.5-10}, and PM_{>10}) morfolojisi ve kimyasal bileşimi analiz edilmiştir. Morfoloji araştırmaları için iki method kullanılmıştır. İlk olarak en boy oranı açısından ön sonuçlar elde etmek için numuneler optik mikroskop altında analiz edilmiştir. İkinci aşamada numuneler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı x-ışını (EDX) kullanılarak morfoloji ve kimyasal bileşimi açısından incelenmiştir.

Tunçbilek linyitinin yanması sonucunda örneklenmiş partiküllerinin morfolojisi ve partikül büyüklük dağılımı, optik mikroskopi kullanılarak değerlendirilmiş ve Şekil 13 gösterilmiştir. Tunçbilek linyit tanecikleri bu raporun 3.1. kısmında yaklaşık olarak küresel olarak gösterilmiştir (Bkz. Şekil 13). Boyut aralığı 2.5µm'den büyük partiküllerin (örneğin PM_{2.5-10} and PM_{>10}) şekilleri de ana yakıtınki gibi yaklaşık olarak küresel görünmüştür. Yine bu boyut aralığındaki partiküllerin en boy oranı da ortalama 1.4 olarak belirlenmiştir. Diğer taraftan boyut aralığı 2.5µm'den küçük partiküller (PM_{2.5}) kusursuz küresel şekle sahip olup en boy oranı 1.0 olarak bulunmuştur.



Şekil 13. Her impaktör kademesi için Tunçbilek linyitinin yanması sonucunda oluşan PM2.5, PM2.5-10, PM>10 Optik mikroskop görüntüleri

Tunçbilek linyitinin yanması sonucunda örneklenmiş partiküllerin hem SEM fotoğrafları hem de SEM-EDX ile elde edilen kimyasal bileşimleri her bir PM boyut aralığı için Şekil 14 ve 15 de verilmiştir.

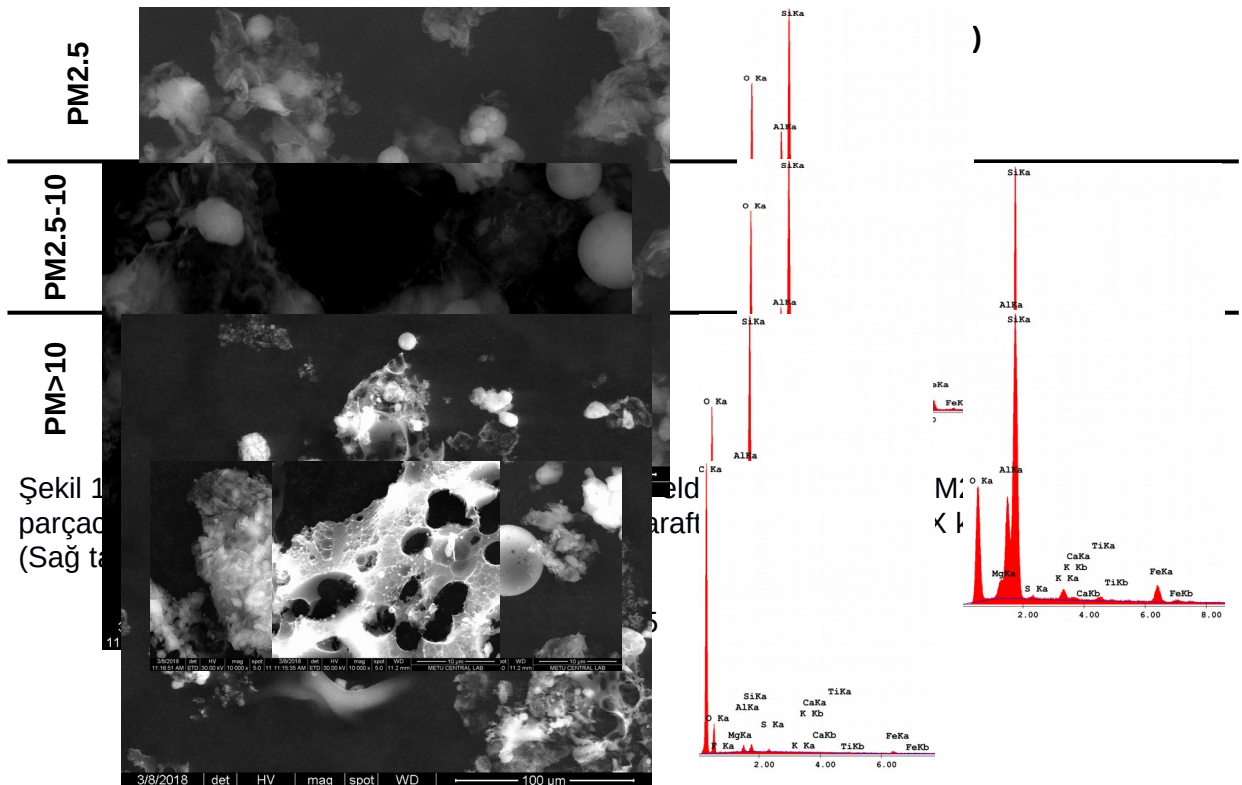
PM2.5 boyut aralığındaki parçacıklarda iki ana morfoloji gözlenmiştir; içi boş küresel tacecikler ve amorf yapılar. İçi boş küresel tacecikler, tipik olarak yanma esnasında minerallerin (örn. K, Na) buharlaşıp yumuşamış/erimiş SiO_2 ve Al_2O_3 yüzeylerine yoğunlaşmasıyla oluşur (Gale vd., 1995; Kazanc vd. 2012; Le Manquais vd., 2009; Vassilev vd., 2013). Bu bilgi ışığında Tunçbilek linyitine bakıldığında, linyitin yüksek Si (% 29) ve Al (% 13 ağırlık) içeriğine sahip olduğu ve aynı zamanda düşük buharlaşma noktasına sahip K (% 1.2 wt.) gibi elementleri barındırdığı için bu tip içi boş küresel tanecikler oluşturduğu söylenebilir (bkz. Şekil 14 a1). Kömürün yanma sıcaklığının (1000 °C), potasyumun buharlaşma sıcaklığından (760 °C) çok yüksek olması, refrakter minerallerin (Si ve Al) varlığı ile birlikte, içi boş küresel taneciklerin oluşumuyla sonuçlanmıştır (Gale vd., 1995). Amorf

yapılar, içi boş küresel taneciklerle aynı kimyasal içeriğe sahiptir. Bu da bu tarz amorf yapıların diğer yapıların aglomerasyonu ve düşük moleküler ağırlığa sahip uçucu bileşiklerin yoğunlaşması sonucunda oluştuğunu göstermektedir.

Şekil 14 b1'de görüldüğü gibi PM_{2.5-10} boyut aralığına sahip parçacıklar PM_{2.5} boyut aralığındaki parçacıklarla benzerlik göstermişlerdir (çoğunlukla içi boş küresel tanecikler ve aglomere amorf yapılar). Bunun dışında bu iki boyut aralığındaki parçacıkların kimyasal içerikleri de birbirlerine benzemektedir dolayısıyla bu parçacıkları oluşturan mekanizmaların da benzer olduğu söylenebilir.

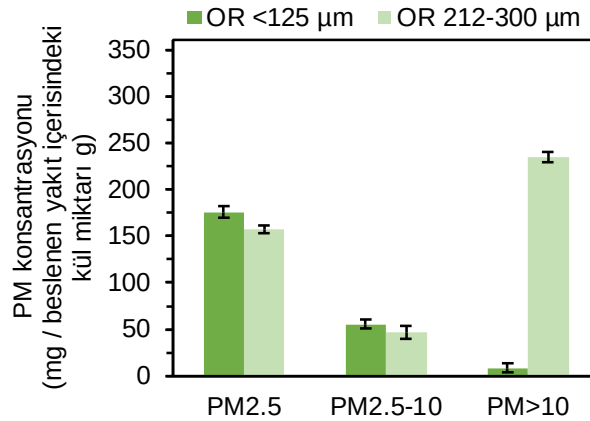
Parçacık boyutu 10 µm'den büyük tanecikler (PM>10) Şekil 14 c1'de görüldüğü gibi üç farklı yapıda gözlenmiştir. Bu yapılar; amorf partiküller, iskelet yapıları ve düşük miktarda küresel partiküllerdir. Küresel parçacıklar karbon içermezken, hem amorf hem de iskelet parçacıkları sırasıyla ağırlıkça %49 ve %84 oranında karbon içermektedirler. Bu açıkça, bu parçacıkların, özellikle gözenekli iskelet benzeri yapıların tamamen yanmadığını yansıtmışlardır. SEM analizi için PM örnekleri bir karbon bant üzerine yerleştirilmiş olmasına rağmen, eğer varsa, bu arka planın arayüzü hiçbir zaman burada kayıtlı olanlar kadar karbon değerlerini üretmeyeceği belirtilmelidir.

Özetle, PM'nin tüm boyut aralıkları iki ana morfoloji sunmuştur: küresel mikron büyüklüğündeki parçacıklar ve amorf süpermikron parçacıklar. Kimyasal bileşim PM_{2.5} ve PM_{2.5-10} boyutlarındaki parçacıklar için Si, Al, Fe ve Mg'un baskın olduğu bir yapıda benzerlik göstermiştir. PM> 10 ise yanmamış partiküller nedeniyle daha yüksek karbon içeriği göstermiştir.

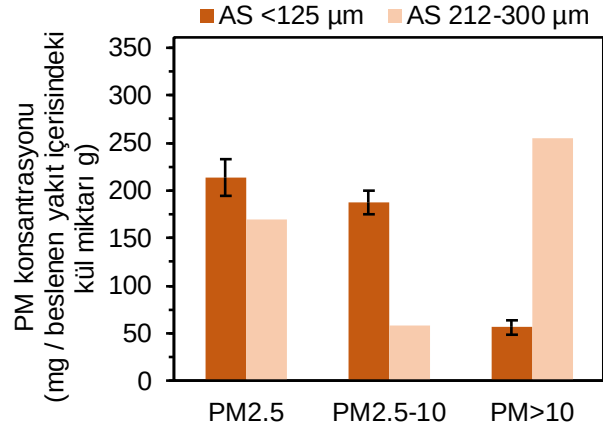


4.2.2 Partikül boyutu etkisi

Partikül büyüklüğünün PM oluşumu üzerindeki etkisi, iki farklı boyut aralığındaki zeytin atığı (OR) ve badem kabuğunun (AS) yakılarak farklı boyut aralıklarındaki küllerinin toplanmasıyla değerlendirilmiştir. Bu boyutlar her iki yakıt için de $<125\ \mu\text{m}$ ve $212-300\ \mu\text{m}$ arasında olacak şekilde belirlenmiştir. Sonuçlar Sekil 15 & 16' da sunulmuştur. Partikül madde oluşumu her bir PM boyut aralığında, daha büyük parçacık boyutlu OR yakıtı kullanıldığında daha düşük olarak gözlemlenmiştir. Örnek olarak, büyük parçacık boyutlu OR partiküllerini ($212-300\ \mu\text{m}$) yakarken $\text{PM}_{2.5}$ emisyonu daha küçük boyutlu ($<125\ \mu\text{m}$) olanlara göre ~% 10 daha düşüktür. Benzer bir şekilde, Badem kabuğunun (AS) büyük parçacık boyutlu olması ~% 20 daha az $\text{PM}_{2.5}$ oluşmasına neden olmuştur. Bu sonuçlar PM oluşumunun partikül boyutuna bağlılığını göstermektedir. $1\ \mu\text{m}$ 'den küçük PM (PM_1) oluşumundaki baskın mekanizma buharlaşma ve yoğuşma olarak gösterilse de yakıt parçacık boyutlarının küçük olmasının da etkisi bulunmaktadır. Bu da bu çalışmadaki düşük parçacık boyutuna sahip yakıtların PM_1 emisyonlarının daha yüksek olmasını açıklamaktadır. Parçacık boyutunun etkisine bir başka muhtemel açıklama ise, büyük partiküllerin yüksek termal kapasitesinin yanma sırasında partikül sıcaklığını düşürmesi ve dolayısıyla buharlaşma oranını azaltması olarak gösterilebilir.



Şekil 15. Farklı boyutlardaki zeytin atığının (OR) yanması sonucunda oluşan farklı boyutlardaki PM konsantrasyonu (PM (mg)/ beslenen yakıt içerisindeki kül miktarı (g)). Dikey çubuklar %98 güven aralığındadırlar.



Şekil 16. Farklı boyutlardaki badem kabuğunun (AS) yanması sonucunda oluşan farklı boyutlardaki PM konsantrasyonu (PM (mg)/ beslenen yakıt içerisindeki kül miktarı (g)). Dikey çubuklar %98 güven aralığındadırlar.

Tablo 10. Farklı birimlerde zeytin atığının (212-300 µm) yanması sonucu elde edilen parçacık madde konsantrasyonu

PM konsantrasyon birimi	PM2.5	PM2.5-10	PM10	PM>10
mg/m ³ hava	82	24.3	106.3	123
mg/ beslenen yakıt içerisindeki kül miktarı (g)	157	46.1	203.2	235
mg/ beslenen yakıt (g)	8	2.4	10.4	8

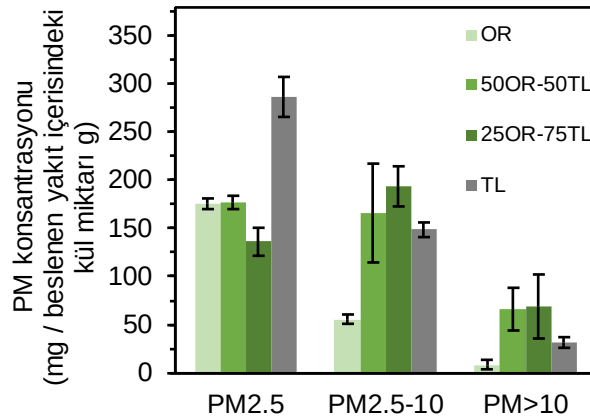
Tablo 11. Farklı birimlerde badem kabuğunun (212-300 µm) yanması sonucu elde edilen parçacık madde konsantrasyonu

PM konsantrasyon birimi	PM2.5	PM2.5-10	PM10	PM>10
mg/m ³ hava	58.3	20	78.3	87.8
mg/ beslenen yakıt içerisindeki kül miktarı (g)	169.4	58.1	227.4	255
mg/ beslenen yakıt (g)	6.6	2.3	8.9	9.9

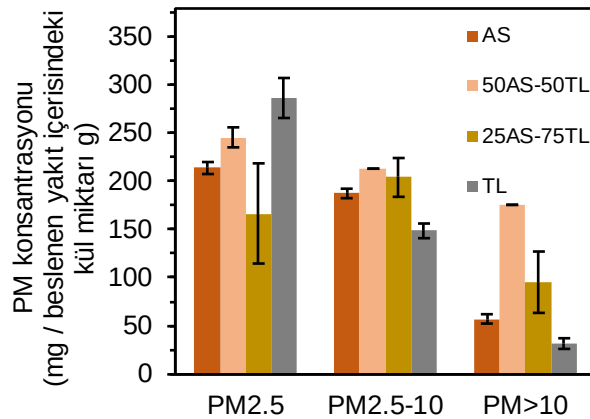
4.2.3 Kömür ve biyokütlenin birlikte yanma etkisi

Birlikte yakma deneyleri OR-TL ve AS-TL karışımları için yapılmıştır (bkz. Tablo 2). Karıştırılan yakıtların boyut aralığı 125 µm arasında olacak şekilde seçilmiştir. Partikül madde konsantrasyonu sonuçları Şekil 17 & 18' de sunulmaktadır. OR karışımlardan elde

edilen PM_{2.5} değeri OR yakıtının tek başına yanması ile elde edilen değere yakinken, PM_{2.5-10} değeri OR ve TL yanmalarından elde edilen değerlerin arasındadır. OR-TL karışımından elde edilen PM_{2.5} emisyon konsantrasyonu (124 mg/m³ hava), OR (59.8 mg/m³) ve TL'den (329 mg/m³) elde edilenlerin orta noktasına denk gelmektedir. 50AS-50TL karışımından elde edilen PM_{2.5} emisyon konsantrasyonu (141 mg/m³) TL ve AS yakıtlarından elde edilen PM_{2.5} (329 mg/m³ ve 50 mg/m³) değerlerin arasındadır. Zellagui vd. (Zellagui vd., 2017), kömürdeki odunsu biyokütlenin ağırlıkça %25'lik oranının mikron altı PM oluşumunu azaltırken ağırlıkça %50 veya %75 oranında biyokütle değerlerinin biyokütleninkilere daha yakın olduğunu gözlemlemiştir. Aynı eğilim burada da gözlenmiştir. Bu yüzden gelecekteki araştırmalarda daha düşük biyokütle oranlarının kullanılması gerekir. Ayrıca, karışımlar için toplanan yüksek sayıda mikron altı ve süpermikron parçacıklarından sorumlu mekanizmaların çıkarılması için toplanan PM emisyonlarının kimyasal analizlerinin detaylı bir şekilde yapılması gerekmektedir.

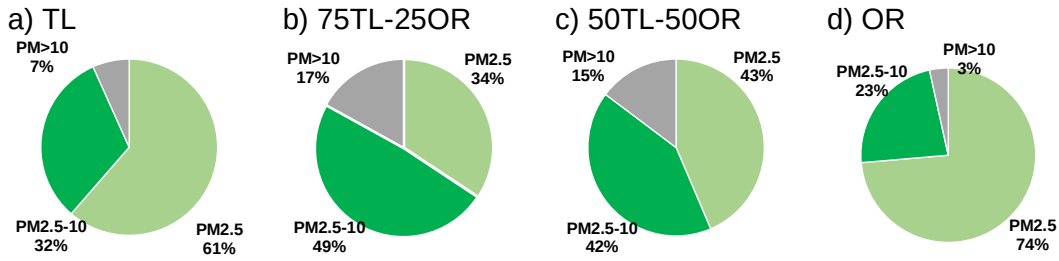


Şekil 17. Tunçbilek linyiti (TL) ve zeytin atığı (OR) karışımlarının yanması sonucunda oluşan farklı boyutlardaki PM konsantrasyonu (PM (mg)/ beslenen yakıt içerisindeki kül miktarı (g)). Bütün yakıtlar < 125 µm. Dikey çubuklar %98 güven aralığındadırlar.



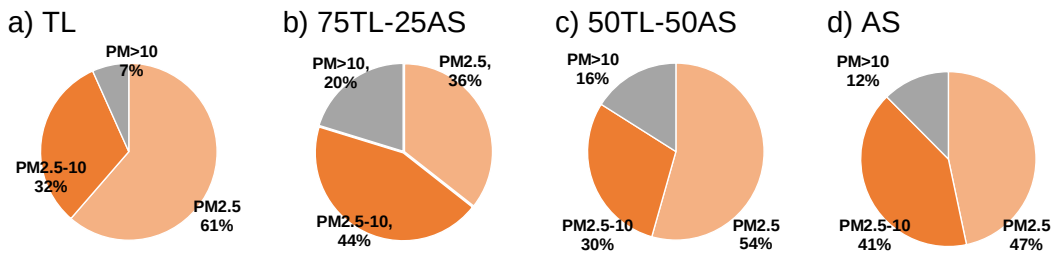
Şekil 18. Tunçbilek linyiti (TL) ve badem kabuğu (AS) karışımlarının yanması sonucunda oluşan farklı boyutlardaki PM konsantrasyonu (PM (mg)/ beslenen yakıt içerisindeki kül miktarı (g)). Bütün yakıtlar < 125 µm. Dikey çubuklar %98 güven aralığındadırlar.

OR ve TL yakıtlarının ve bu yakıtlardan elde edilen karışımların PM emisyon dağılımları Şekil 19' da gösterilmiştir. OR yakıtının PM emisyonlarının %74'ünü PM2.5 oluşturmakla birlikte TL için bu pay %61 olarak hesaplanmıştır. Bu iki yakıtın karışımındaki OR oranının %25'ten %50'ye artırılması PM2.5 emisyonunu %9 artırmıştır. Bunun yanı sıra, PM2.5-10 emisyonu %23 ile en düşük değerine OR yanmasında ulaşırken, en yüksek değerine % 49 ile 75TL-25OR karışımında ulaşmıştır. Özetle TL linyitini OR biyokütlesi ile yakmak PM2.5 emisyonunu azaltırken PM2.5-10 emisyonunu artırmıştır.



Şekil 19. TL, OR, ve bu yakıtların karışımlarının PM emisyon dağılımları

AS ve TL yakıtlarının ve bu yakıtlardan elde edilen karışımların PM emisyon dağılımları Şekil 20' de gösterilmiştir. Bu yakıtlar arasında en yüksek PM2.5 oranını %61 ile TL göstermiştir. Şekil 19'da gösterilen OR-TL eğilimine yakın bir eğilim AS-TL karışımları için de gözlemlenmiştir. TL linyitine AS biyokütlesi kütlege %25 karıştırıldığında (75TL-25AS), PM2.5 oranı %61'den %36'ya düşmüştür. AS yakıtının karışımında %25'ten (75TL-25AS) %50'ye (50TL-50AS) artması PM2.5 emisyon oranlarını %36'dan %54'e artırmıştır. PM2.5-10 oranları en düşük 50TL-50AS karışımı için olurken (%30), en yüksek oranlar 75TL-25AS karışımı için elde edilmiştir (%44). Sonuç olarak PM2.5 emisyonunu azaltmak ve kontrolünü kolaylaştırmak için TL linyitinin AS biyokütlesiyle kütlege %75TL-%25AS oranında karıştırılması önerilebilir.



Şekil 20. TL, AS, ve bu yakıtların karışımlarının PM emisyon dağılımları

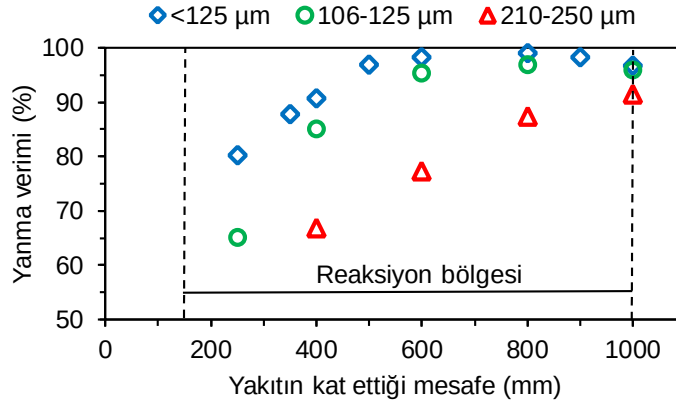
4.3 Düşey borulu fırın kullanılarak elde edilen kömürün yanma kinetiği

Biyokütle ve linyitin beraber yanması düşünüldüğünde, pulverize kazanlarda her iki türdeki yakıt taneciklerinin kalma sürelerinin yanma verimi üzerinde çok önemli etkileri vardır. Bu amaçla yakıtların kalma sürelerinin ve yanma verimlerinin tayin edilmesi çok kritiktir. Bu çalışmada kalma süresinin yanma verimine etkisini gözlemlemek için bütün yanma parametreleri (sıcaklık, ısıtma hızı, hava fazlalığı) sabit tutularak farklı yanma sürelerinde yüksekliği ayarlanabilir bir toplama probu yardımıyla reaktörün düşey ekseninden parçacıklar toplanmış ve toplanan parçacıkların yanma verimi elde edilmiştir.

4.3.1 Kalma süresinin çarın yanma verimine etkisi

Bu çalışmada yanma veriminin farklı kalma sürelerindeki tespiti için Tunçbilek linyiti yakıt olarak seçildi. Bunun yanı sıra yakıt tanecik boyutunun yanma verimine etkisinin anlaşılabilmesi için aynı yakıtın farklı tanecik boyutları (<125, 106-125, 210-250 μm) düşey borulu fırında test edildi. Yakıtların kalma süreleri, toplama probunun reaktörün düşey ekseninde farklı konumlandırılması sonucunda elde edilmiştir. Yanma veriminin, parçacıkların toplandıkları reaksiyon bölgesinin düşey eksen konumlarına göre grafiği Şekil 21' de verilmiştir. Beklenildiği gibi büyük tanecikli yakıtların yanma verimi her konumda (kalma süresinde) küçük tanecikli yakıtlara göre daha az olmuştur. Büyük tanecikli yakıtın (210-250 μm) en yüksek yanma verimi değeri reaktörün sonundan %90 olarak elde edilmiştir. Diğer iki tanecik boyutlu yakıtın yanma verimi değerleri (%95-98) reaksiyon bölgesinin son 400 mm'sinde benzerlik göstermiştir. Ancak enjektörün hemen sonrasında (reaksiyon bölgesinin başında) yanma verimi değerleri yakıtın tanecik boyutuna göre değişiklik göstermiştir. Özellikle enjektör ucundan 350 mm aşağıda yanma verimi, <125 μm tanecik boyutunda %80'ken, 106-125 μm boyutlu yakıtlarda %65'lere gerilemiştir. Bu da ilk boyut aralığında 106 μm 'den küçük tanecikli yakıtların hemen enjektör sonrasında yanmaya başladığını göstermektedir.

Özet olarak Şekil 21' de gösterilen veriler parçacığın kalma süresi ile ilişkilendirildiğinde, hangi yakıt boyutu için ne kadar kalma süresi gerektiği hakkında kantatif bilgiler vermektedir. Burada kullanılan deney düzeneğindeki yanma koşulları (konveksiyonel ve radyasyonel ısı iletimi, ısıtma hızları, vb.) kısmen de olsa gerçek yanma koşullarına benzetildiği için bu bilgilerin pulverize kazanlarda kıyaslama amaçlı kullanılabileceği sonucu çıkmaktadır.



Şekil 21. Farklı boyut aralıklarındaki Tunçbilet linyitinin (TL), düşey borulu fırının (DBF) reaksiyon bölgesinin farklı aksenal konumlarından elde edilen yanma verimi

4.3.2 Birinci derece kinetic analizi

Tunçbilet linyitinin (TL) farklı boyut aralıklarındaki parçacıklarının yanma reaksiyon sabitleri hesaplanmıştır. Bu sabitler parçacıkların reaksiyon bölgesinin çeşitli konumlarından elde edilen yanma verimi verileri sayesinde hesaplanmıştır. Çar yanması için izotermal koşullardaki genel birinci derece reaksiyon modeli (Walker, Jr P.L. vd., 1959), bkz. denklem (2), kullanılmıştır.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = k(1 - \alpha) \quad (2)$$

α

Denklem (2)'deki k, reaksiyon sabiti, t, zaman, α ise denklem (3)'te gösterilen oransal kütle çevrimidir.

$$\alpha = 1 - C/C_0 \quad (3)$$

Denklem (3)'teki C, toplanan parçacığın yanmamış çar kütlesi, C₀ ise reaksiyondan önceki çar kütlesidir.

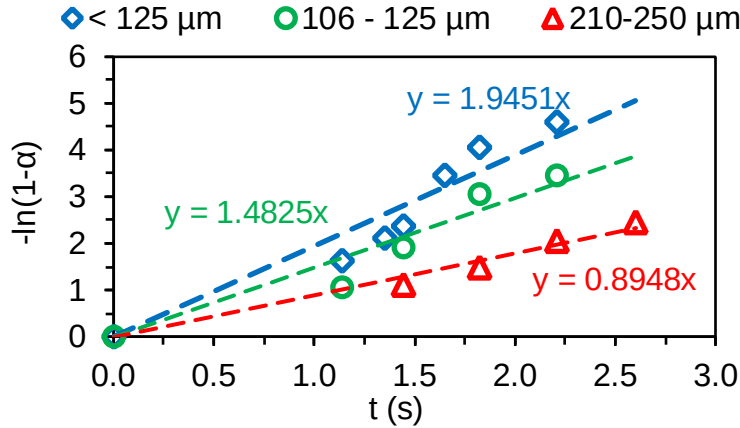
$$\alpha = 0$$

Denklem (1)'in sınır koşulları $\alpha = 0$ at t=0 olacak şekilde integralinin alınması durumunda denklem (4)'teki eşitliği vermektedir:

$$-\ln(1 - \alpha) = kt \quad (4)$$

Bu çalışmada birinci derece kinetik sabitler, deneysel verilerle elde edilen $-\ln(1-\alpha)$ t karşı kalma süresi (t) grafiğine doğrusal olarak fit edilerek bulunmuştur.

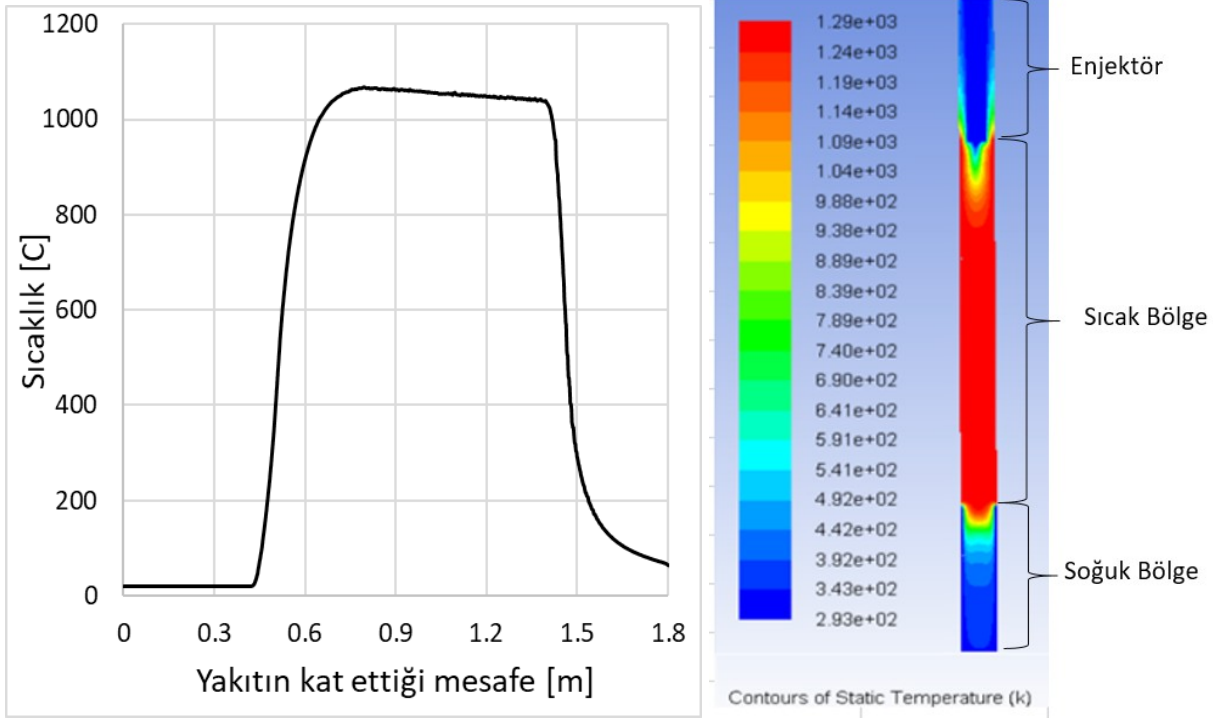
Tunçbilek linyiti için fit edilmiş kinetik veriler Şekil 22' te gösterilmiştir. Şeklin yatay ekseninde gösterilen kalma süreleri reaktörün düşey eksen boyunca parçacıkların toplandıkları andaki reaktördeki kalma sürelerini temsil etmektedir. Bu sürelerin deneysel olarak elde edilmesi zor olduğu için nümerik analiz sonucunda boyutu 100 μm olan parçacığın toplama noktalarındaki kalma süreleri hesaplanmış ve bu değerin burada kullanılan numuneler için yaklaşık bir değer olacağı varsayılmıştır. Kinetik hız sabitleri Şekil 22' de görüldüğü gibi parçacık boyutu küçüldükçe artış göstermiştir. Hız sabitleri, 210-250 μm , 106-125 μm ve < 125 μm parçacık boyut aralığındaki TL yanması için sırasıyla 0.89, 1.48 ve 1.94'dür. Küçük boyutlu parçacıkların yanma hız sabitlerinin daha yüksek olmasının nedeni daha düşük ısı ataletine sahip olmalarıyla alakalıdır. Düşük ısı atalet parçacık boyunca gerçekleşen ısı transferinin daha yüksek olmasını dolayısıyla da daha hızlı yanmasını sağlamaktadır. Parçacık boyutunun yanma hız sabitleri üzerindeki görünen etkisi düşey botulu fırındaki yanma rejiminin difüzyon kısıtlı ya da karışık bölgede olduğunu göstermektedir. Örneklemek gerekirse parçacık boyutunun iki katına çıkması hız sabitlerini de %50 oranında artırmıştır, bkz Şekil 22.



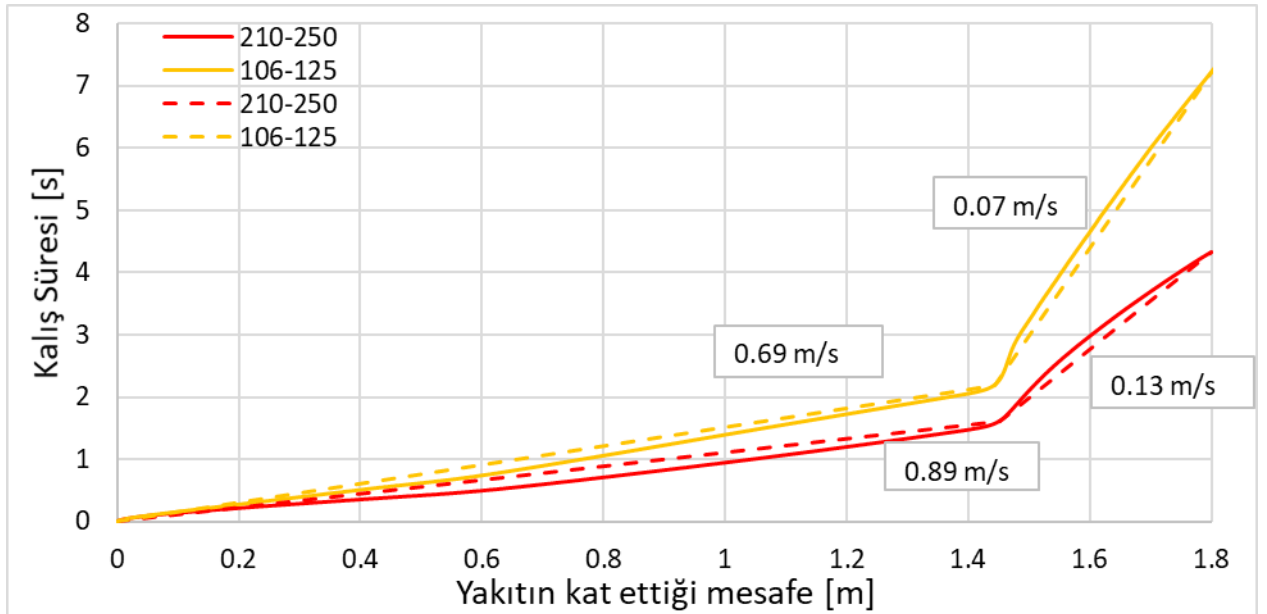
Şekil 22. Farklı boyut aralığındaki Tunçbilek linyitlerinin (TL), $-\ln(1-\alpha)$ karşı kalma süresi (t) grafiği

4.4 Deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması

Bu başlık altında düşey borulu fırının içindeki sıcaklık ve hız profili yer almaktadır (bkz. Şekil 23 & 24). Bu koşullara sahip düşey borulu fırına beslenen tunçbilek linyitinin yanma verimi deneysel olarak elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmıştır.

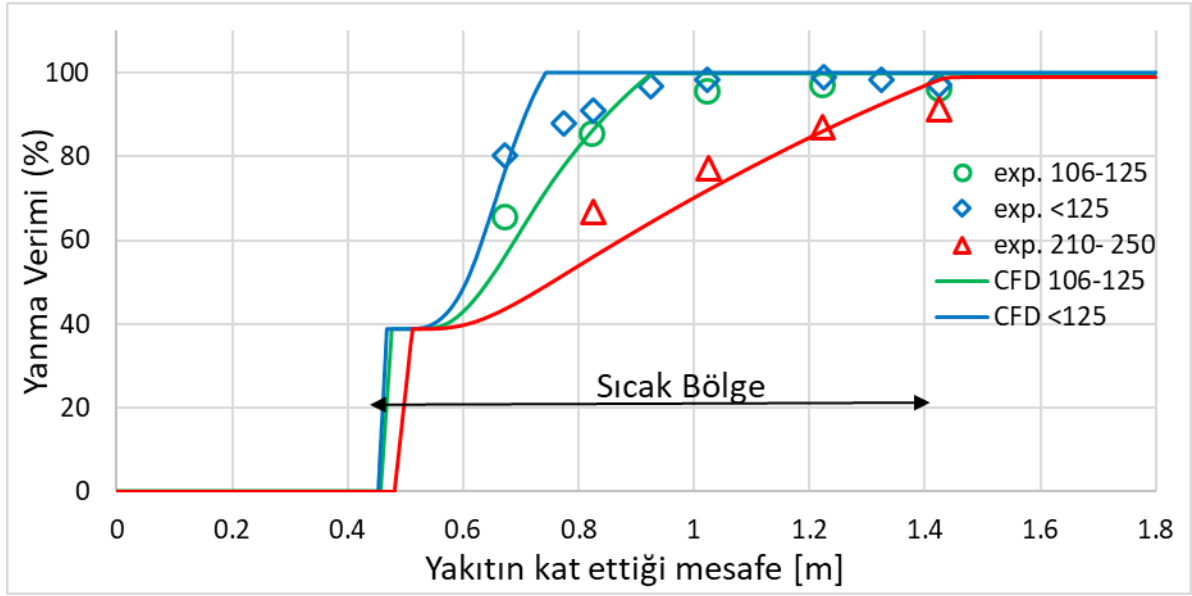


Şekil 23. Enjektörün girişinden beslenen yakıtın sıcaklık profile (sol) ve Düşey borulu fırının sıcaklık kontur görüntüsü (sağ)



Şekil 24. Beslenen yakıtın düşey borulu fırın boyunca kalış süresi (Tire çizgiler düz çizgilerin fit edilmiş halleridir)

Şekil 25' de beslenen yakıtın düşey borulu fırın boyunca deneysel ve HAD analizlerinden elde edilen yanma verimi dağılımı verilmiştir. Yüksek ısıtma hızında yakılan yakıtlarda, uçucu madde salınımı ve karbon yanması birbiri içine girmektedir fakat Fluent programında bu işlemler sıralı olarak tanımlanmıştır. Şekil 25' de HAD analizlerinde bu durum açıkça görülmektedir. HAD analizlerinde beslenen yakıtın içinde bulunan bütün uçucu madde yakıtı terketmeden karbon yanması başlamamıştır.



Şekil 25. Deneysel ve HAD analizlerinden elde edilen yanma verimi dağılımı

5. SONUÇ

Bu projede, Türkiye'nin çeşitli bölgelerinden elde edilen farklı türdeki linyit ve biyokütle karışımlarının pulverize yanma davranışları incelenmiştir. Proje kapsamında yapılan deneyler, büyük ölçekli kazanlardaki yanma parametrelerini kısmen oluşturabilen düşük borulu fırın kullanılarak yapılmıştır. Deney sonuçları bütün yakıtların ve yakıt karışımlarının yanma verimlerini, partikül madde emisyonunu ve yanma kinetiğini içerir bir şekilde eklenmiştir.

Proje sonunda varılan sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- **Partikül Madde (PM):** PM emisyonu doğrudan yakıt türüne ve boyutuna bağlılık göstermiştir. Bu açıdan biyokütle ve linyit karışımlarındaki oranları ve boyutları belirlemek PM emisyonlarını kontrol etmek açısından çok önemli görülmüştür.
 - o İki farklı boyut aralığında (<125 µm ve 212-300 µm) test edilen zeytin atığı ve badem kabuğunun yanması sonucu açığa çıkan PM2.5 emisyonu konsantrasyon (mg/ beslenen yakıt içerisindeki kül miktarı (g)) açısından benzerlik göstermiştir. Bu sonuçlar, çalışılan Türk tarımsal kalıntılarının mevcut yakılan linyit boyutundan (<125 µm) daha büyük boyutta (212-300 µm) yakılabileceğini ve mevcut PM2.5 emisyonunda bir değişiklik yaratmayacağını göstermiştir.
 - o Linyite biyokütle karıştırılıp yakıldığında PM2.5 emisyon değerlerinde azalma gözlemlenmiştir (bkz. Şekil 17 & 18).
 - o Linyite biyokütle karıştırılıp yakıldığında PM2.5-10 emisyonlarında artış gözlemlenmiştir (bkz. Şekil 17 & 18).
 - o % 50'ye varan zeytin atığı ve % 25 badem kabuğunun biyokütle-linyit oranları, biyokütle yakıtın yalnız yakılmasından daha az PM2.5 emisyonuna yol açmıştır.
- **Yanma verimi ve kinetiği**
 - o Kömür ve biyokütle partiküllerinin (birlikte-) yanma kazanlarında kalma süresinin yanma verimine doğrudan etkisi olmuştur. Yanmanın kalma süresi içinde tamamlanması, daha yüksek enerji çıkışı ve daha az gaz emisyonuna neden olmuştur. Biyokütle ve kömür yanmasının

tamamlanması için 2 saniye civarında kalma süresine ihtiyacı olduğu tespit edilmiştir.

- o Yanma kinetiği yakıtın partikül boyutlarıyla önemli ölçüde değişiklik göstermiştir. Partikül çapının yarıya indirilmesi, yanma kinetik hız sabitlerinin %50 artışına sebep olmuştur.
- o HAD sonuçları, tüm parçacık boyutları için deneysel sonuçlarla uyum göstermiştir.
- o Kullanılan enjektörün yakınlarından parçacıkların toplanması deneysel olarak zor olduğu için uçucu madde yanması HAD analizleri ile çözümlenmelidir. Uçucu yanma süreleri (HAD), deneysel olarak elde edilmiştir ve çar yanma başlangıcı ile uyum içindedir.

6. GELECEKTEKİ ÇALIŞMALAR VE ÖNERİLER

Bu projede, seçilmiş Türk linyitlerinin ve biyokütlelerinin yanması incelenmiştir. Burada ilgili katı yakıtların yanma verimi, partikül madde emisyonu ve yanma kinetiği gibi parametreler elde edilmiş ve üzerine çalışılmıştır. Bu proje çerçevesinde ODTÜ Makina Mühendisliği Temiz Yanma Teknolojileri Laboratuvarına düşey borulu fırın kurulmuştur. Bu fırın kullanılarak gelecekte yapılması planlanan çalışmalar aşağıdaki gibidir:

- **Linyit ve biyokütle birlikte yanmasının yanma kinetik analizi:**

Tunçbilek, Soma ve Afşin-Elbistan linyitlerin zeytin kalıntısı ve badem kabuğu gibi biyokütlelerle karışımları düşey borulu fırında yakılacaktır. Farklı kalma süreleri ile yapılacak bu deneylerden çar ve kül örnekleri toplanacak ve kömür-biyokütle birlikte yanmasının kinetik verileri elde edilecektir.

- **Yüksek sıcaklıklarda partikül madde emisyonu:**

Bazı alkali türlerinin buharlaşmasının 1000 °C üzerindeki sıcaklıklarda gerçekleşebilmesi nedeniyle, mikron altı partikül madde (PM_{2.5}) oluşumu sıcaklığa büyük ölçüde bağlıdır. Buna göre, PM emisyonu 1500 °C sıcaklıklarda çalışılacak ve sonuçlar bu proje kapsamında elde edilenlerle karşılaştırılacaktır.

- **Düşey borulu fırından elde edilen biyokütle ve kömür kömürlerinin gazlaştırılması:**

Biyokütle ve linyit kömürleri düşük kalorifik değere sahip yakıtlardır, bu nedenle bu yakıtları gazlaştırmak çoğu zaman avantajlıdır. Bunun endüstriyel uygulamalarında, biyokütle ve kömür yüksek sıcaklıklarda, yüksek ısıtma hızlarında ve N₂, CO₂ ve buhar karışımı altında gazlaştırılır. Literatürdeki çalışmaların çoğu TGA deneylerine dayanmaktadır. Bu deneylerde düşük ısıtma hızlarında elde edilen sonuçlar büyük ölçekteki gazlaştırma tesislerinden elde edilenlerle önemli derecede farklılık gösterebilmektedir. Planlanan çalışmada yüksek ısıtma hızında çar üretmek için düşey borulu fırın kullanılacak ve daha sonra N₂+CO₂'nin farklı oranlardaki karışımları altında TGA kullanılarak üretilen çar gazlaştırılacak. Temiz Yanma Laboratuvarında düşey borulu fırın kullanılarak çar üretimi (piroliz) denenmiş olup farklı kömürler ve biyokütle yakıtları için başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

7. REFERANSLAR

- Al-Mansour, F., Zuwala, J. (2010). "An evaluation of biomass co-firing in Europe." *Biomass and Bioenergy*, Elsevier Ltd, 34(5), 620–629.
- Arias, B., Pevida, C., Rubiera, F., Pis, J. J. (2008). "Effect of biomass blending on coal ignition and burnout during oxy-fuel combustion." *Fuel*, 87(12), 2753–2759.
- ASTM. (2011). "Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal D3174-12." *ASTM International*, 1–6.
- ASTM. (2015). "Standard test method for ash in biomass E1755 - 01." *ASTM*, 44, 153–161.
- Branco, V., Costa, M. (2017). "Effect of particle size on the burnout and emissions of particulate matter from the combustion of pulverized agricultural residues in a drop tube furnace." *Energy Conversion and Management*, Elsevier Ltd, 149, 774–780.
- Costa, F. F., Wang, G., Costa, M. (2015). "Combustion kinetics and particle fragmentation of raw and torrefied pine shells and olive stones in a drop tube furnace." *Proceedings of the Combustion Institute*, 35(3), 3591–3599.
- Feng, C., Gao, X., Wu, H. (2017). "Emission of particulate matter during the combustion of bio-oil and its fractions under air and oxyfuel conditions." *Proceedings of the Combustion Institute*, Elsevier, 36(3), 4061–4068.
- Fix, G., Seames, W., Mann, M., Benson, S., Miller, D. (2013). "The effect of combustion temperature on coal ash fine-fragmentation mode formation mechanisms." *Fuel*, Elsevier Ltd, 113, 140–147.
- De Fusco, L., Boucquey, A., Blondeau, J., Jeanmart, H., Contino, F. (2016). "Fouling propensity of high-phosphorus solid fuels: Predictive criteria and ash deposits characterisation of sunflower hulls with P/Ca-additives in a drop tube furnace." *Fuel*, 170, 16–26.
- Gale, T. K., Fletcher, T. H., Bartholomew, C. H. (1995). "Effects of Pyrolysis Conditions on Internal Surface Areas and Densities of Coal Chars Prepared at High Heating Rates in Reactive and Nonreactive Atmospheres." *Energy and Fuels*, 9(3), 513–524.
- IARC. (2018). "IARC Scientific Publication No. 161: air pollution and cancer." <<http://www.iarc.fr/en/publications/books/sp161/index.php>> (February).
- International Energy Agency (IEA). (2016). *Energy Policies of IEA Countries: Turkey, 2016 Review*. Paris, France.
- Jurado, N., Simms, N. J., Anthony, E. J., Oakey, J. E. (2017). "Effect of co-firing coal and biomass blends on the gaseous environments and ash deposition during pilot-scale oxy-combustion trials." *Fuel*, 197, 145–158.

- Kazanc, F., Khatami, R., Crnkovic, P. M., and Levendis, Y. A. (2011). "Emissions of NO_x and SO₂ from Coals of Various Ranks , Bagasse , and Coal-Bagasse Blends Burning in O₂ / N₂ and O₂ / CO₂ Environments ." *Energy & Fuels*, 25(x), 2850–2861.
- Kazanc, F., Levendis, Y. A. (2012). "Physical Properties of Particulate Matter Emitted from Combustion of Coals of Various Ranks in O₂ /N₂ and O₂ /CO₂ Environments." *Energy & Fuels*, 26(12), 7127–7139.
- Kazanc, F., Levendis, Y. A., Maffei, T. (2013). "Chemical Composition of Submicrometer Particulate Matter (PM₁) Emitted from Combustion of Coals of Various Ranks in O₂/N₂ and O₂/ CO₂ Environments." *Energy & Fuels*, 27, 4984–4998.
- Khatami, R., Levendis, Y. A. (2016). "An overview of coal rank influence on ignition and combustion phenomena at the particle level." *Combustion and Flame*, Elsevier Inc., 164, 22–34.
- Li, G., Li, S., Dong, M., Yao, Q., Guo, C. Y., Axelbaum, R. L. (2013). "Comparison of particulate formation and ash deposition under oxy-fuel and conventional pulverized coal combustions." *Fuel*, 106, 544–551.
- Li, J., Zhu, M., Zhang, Z., Zhang, K., Shen, G., Zhang, D. (2016). "The mineralogy, morphology and sintering characteristics of ash deposits on a probe at different temperatures during combustion of blends of Zhundong lignite and a bituminous coal in a drop tube furnace." *Fuel Processing Technology*, 149, 176–186.
- Linak, W. P., Miller, C. A., Seames, W. S., Wendt, J. O. L., Ishinomori, T., Endo, Y., Miyamae, S. (2002). "On trimodal particle size distributions in fly ash from pulverized-coal combustion." *Proceedings of the Combustion Institute*, 29(1), 441–447.
- Livingston, W., Willeboer, W., Tosney, S., Sander Madrali, B. S., Hansen, M. (2016). *The status of large scale biomass firing The milling and combustion of biomass materials in large pulverised coal boilers*.
- Loo, S. Van, and Koppejan, J. (2008). *The Handbook of Biomass Combustion & Co-firing*. (Earthscan, ed.), London.
- Luan, C., You, C., Zhang, D. (2014). "Composition and sintering characteristics of ashes from co-firing of coal and biomass in a laboratory-scale drop tube furnace." *Energy*, 69, 562–570.
- Majumder, A. K., Jain, R., Banerjee, P., Barnwal, J. P. (2008). "Development of a new proximate analysis based correlation to predict calorific value of coal." *Fuel*, 87(13–14), 3077–3081.
- Le Manquais, K., Snape, C., McRobbie, I., Barker, J., Pellegrin, V. (2009). "Comparison of the combustion reactivity of TGA and drop tube furnace chars from a bituminous coal."

- Energy and Fuels*, 23, 4269–4277.
- Magalhaes, D., Panahi, A., Kazanc, F., Levendis, Y. A. (2019). "Comparison of single particle combustion behaviours of raw and torrefied biomass with Turkish lignites." *Fuel*, 241, 1085–1094.
- Mayoral, M. C., Izquierdo, M. T., Andrés, J. M., Rubio, B. (2001). "Different approaches to proximate analysis by thermogravimetry analysis." *Thermochimica Acta*, 370(1–2), 91–97.
- Mills, S. (2014). "Prospects for coal and clean coal technologies in Turkey." *July*.
- Ndibe, C., Maier, J., Scheffknecht, G. (2015). "Combustion, cofiring and emissions characteristics of torrefied biomass in a drop tube reactor." *Biomass and Bioenergy*, 79, 105–115.
- Rabaçal, M., Pereira, S., Costa, M. (2017). "Review on Pulverized Combustion of Non-Woody Residues." *Energy & Fuels*, acs.energyfuels.7b03258.
- Ruscio, A., Kazanc, F., Levendis, Y.A. (2014). "Characterization of Particulate Matter Emitted from Combustion of Various Biomasses in O₂/N₂ and O₂/CO₂ Environments." *Energy & Fuels*, 28(1–2), 685–696.
- Ruscio, A., Kazanc, F., Levendis, Y.A. (2016). "Comparison of Fine Ash Emissions Generated from Biomass and Coal Combustion and Valuation of Predictive Furnace Deposition Indices: A Review." *Journal of Energy Engineering*, 142(2).
- Seames, W. S. (2003). "An initial study of the fine fragmentation fly ash particle mode generated during pulverized coal combustion." *Fuel Processing Technology*, Elsevier, 81(2), 109–125.
- Sippula, O., Hokkinen, J., Puustinen, H., Yli-Pirilä, P., Jokiniemi, J. (2009). "Comparison of particle emissions from small heavy fuel oil and wood-fired boilers." *Atmospheric Environment*, Pergamon, 43(32), 4855–4864.
- Steer, J., Marsh, R., Griffiths, A., Malmgren, A., Riley, G. (2013). "Biomass co-firing trials on a down-fired utility boiler." *Energy Conversion and Management*, 66(x), 285–294.
- Sung, Y., Lee, S., Kim, C., Jun, D., Moon, C., Choi, G., Kim, D. (2016). "Synergistic effect of co-firing woody biomass with coal on NO_x reduction and burnout during air-staged combustion." *Experimental Thermal and Fluid Science*, Elsevier Inc., 71(x), 114–125.
- Suriyawong, A., Gamble, M., Lee, M. H., Axelbaum, R., Biswas, P. (2006). "Submicrometer particle formation and mercury speciation under O₂-CO₂ coal combustion." *Energy and Fuels*, 20(6), 2357–2363.
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., Vassileva, C. G. (2013). "An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical

- composition and classification." *Fuel*, Elsevier Ltd, 105, 40–76.
- Walker, Jr P.L., Rusinko, Jr F., Austin, L. G. (1959). "Gas reactions of carbon." *Advances in catalysis and related subjects*, Academic Press, London, 11.
- Wang, G., Silva, R. B., Azevedo, J. L. T., Martins-Dias, S., Costa, M. (2014a). "Evaluation of the combustion behaviour and ash characteristics of biomass waste derived fuels, pine and coal in a drop tube furnace." *Fuel*, 117, 809–824.
- Wang, X., Hu, Z., Deng, S., Xiong, Y., Tan, H. (2014b). "Effect of biomass/coal co-firing and air staging on NO_x emission and combustion efficiency in a drop tube furnace." *Energy Procedia*, 61, 2331–2334.
- Wen, C., Gao, X., Yu, Y., Wu, J., Xu, M., Wu, H. (2015). "Emission of inorganic PM₁₀ from included mineral matter during the combustion of pulverized coals of various ranks." *Fuel*, Elsevier Ltd, 140, 526–530.
- Wolski, N., Maier, J., Hein, K. R. G. (2004). "Fine particle formation from co-combustion of sewage sludge and bituminous coal." *Fuel Processing Technology*, 85(6–7), 673–686.
- Xu, M., Yu, D., Yao, H., Liu, X., Qiao, Y. (2011). "Coal combustion-generated aerosols: Formation and properties." *Proceedings of the Combustion Institute*, Elsevier Inc., 33(1), 1681–1697.
- Zellagui, S., Trouvé, G., Schönnenbeck, C., Zouaoui-Mahzoul, N., Brilhac, J. (2017). "Parametric study on the particulate matter emissions during solid fuel combustion in a drop tube furnace." *Fuel*, 189, 358–368.
- Zhan, Z., Fry, A., Zhang, Y., Wendt, J. O. L. (2015). "Ash aerosol formation from oxy-coal combustion and its relation to ash deposit chemistry." *Proceedings of the Combustion Institute*, The Combustion Institute, 35(2), 2373–2380.
- Zhang, L., Ninomiya, Y. (2006). "Emission of suspended PM₁₀ from laboratory-scale coal combustion and its correlation with coal mineral properties." *Fuel*, 85(2), 194–203.
- Zhang, L., Ninomiya, Y., Yamashita, T. (2006). "Formation of submicron particulate matter (PM₁) during coal combustion and influence of reaction temperature." *Fuel*, 85(10–11), 1446–1457.
- Zhuo, J. K., Li, S. Q., Yao, Q., Song, Q. (2009). "The progressive formation of submicron particulate matter in a quasi one-dimensional pulverized coal combustor." *Proceedings of the Combustion Institute*, 32 II, 2059–2066.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Dr. Öğr. Üyesi FEYZA KAZANÇ ÖZERİNÇ
Proje No:	214M332
Proje Başlığı:	Türk Linyitlerinin Çeşitli Biyokütleler Ve Atık Manyezit Tozu Ile Pulverize Yanma Özelliklerinin Düşey Borulu Fırında İncelenmesi
Proje Türü:	3501 - Kariyer
Proje Süresi:	36
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ORTA DOĞU TEKNİK Ü. MÜHENDİSLİK F. MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/04/2015 - 15/10/2018
Onaylanan Bütçe:	335173.0
Harcanan Bütçe:	256173.28
Öz:	<p>Bu projede, düşey borulu fırın kullanılarak iki adet biyokütle (zeytin kalıntısı ve badem kabuğu) ile Türk linyitinin birlikte yakılmasının yanma verimliliğinin artırılması ve gerekli verilerin endüstriye sağlanması amaçlanmıştır. Partikül büyüklüğünün etkisini araştırmak için yakıtlar farklı boyut aralıklarına öğütülmüştür ve yakıtlar arasındaki etkileşimleri analiz etmek için farklı biyokütle / kömür oranlarında mekanik olarak karıştırılmışlardır. Düşey borulu fırın deneyleri yüksek sıcaklık (1000 °C), yüksek ısıtma hızı (~ 104 °C s-1) ve kısa kalma sürelerinde (~ 3 s) gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği düşey borulu fırın, besleme ünitesi ve partikül toplama ünitesinden oluşmaktadır. Yakıt, şırınga pompası kullanılarak düşük kütle besleme hızında (10 g/saat) fırına püskürtülmüştür. Kül parçacıkları reaksiyon alanının sonundan kademeli impaktör ve vakum pompası kullanılarak toplanmıştır. Toplanan partiküller impaktörün farklı kademelerinde partikül madde (PM) çaplarına göre (PM2.5, PM2.5-10 ve PM büyüktür 10) kategorize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar yakıtların ve yakıt karışımlarının, yanma verimini, yanma kinetiklerini, ve partikül madde konsantrasyon ve karakterizasyonu içermektedir. Büyük parçacıkların yanma verimi aynı kalma sürelerinde küçük parçacıklara kıyasla daha düşük bulunmuştur. Küçük parçacıkların yanma verimi ise ~ 2 s' den daha uzun kalma sürelerinde değişiklik göstermemiştir. PM emisyonu büyük ölçüde yakıtın cinsine ve yakıt karışım ise karışım oranına bağlı olmuştur. Kullanılan biyokütleler, linyit ile karşılaştırıldığında daha düşük PM2.5 oluşumuna neden olmaktadır. Yakılan biyokütlelerin boyutundaki artış PM büyüktür 10 emisyonunda artışa neden olurken PM2.5 emisyonunda benzer sonuçlar vermiştir. Linyitin tek başına yakılması, biyokütle ile birlikte yakılmasına kıyasla daha düşük PM2.5 emisyonuna neden olmuştur. PM2.5 emisyonunda görülen bu düşüş her iki biyokütle- kömür karışımında da gözlenmiştir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kullanılarak yapılan analizler, katı yakıt yanmasını etkileyen her bir termo- fiziksel işlemin karakterizasyonu ve deneysel çalışma için tamamlayıcı veriler sağlamıştır. Deney sonuçları HAD analizleri ile karşılaştırılmıştır ve veriler arasında uyum bulunmuştur.</p>
Anahtar Kelimeler:	düşey borulu fırın; yanma; Türk linyiti; Türk biyokütlesi; birlikte yanma; PM emisyonları
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır